

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

汪啸风¹, STOUGE Svend², MALETZ Jörg³, 王传尚¹, 阎春波¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 哥本哈根大学丹麦自然历史博物馆, 丹麦 哥本哈根; 3. 柏林自由大学地质研究所, 德国 柏林)

摘要: 对全球寒武系与奥陶系界线层型剖面和点位(GSSP)——西纽芬兰绿岬(Green Point)剖面和我国吉林白山(原浑江)大阳岔小洋桥原全球寒武系与奥陶系界线候选剖面的对比研究表明, 绿岬“金钉子”剖面所指定的界线生物标志——波动古大西洋牙形石(*Iapetognathus fluctivagus*)并不存在于所指定的界线生物层和点位上, 而且在分布和分类上是均存在争议的物种, 更遗憾的是, 所展示的大部分牙形石和笔石标本图片以及碳氧同位素异常数据也并非来自该“金钉子”剖面, 因而完全违背了选择金钉子剖面的原则和要求, 有必要进行重新的评估。小洋桥寒武系与奥陶系界线剖面交通方便、环境优美, 寒武系与奥陶系界线地层系由一套深水且未变质的黑色、黄绿色页岩与灰色薄层瘤状灰岩所构成的韵律沉积组成, 并保存了完整的具有广泛代表性牙形石和笔石序列, 在详细研究的34 m界线间隔中, 自下而上保存了完整的<*Cambrostodus*、*C. proavus*、*C. intermedius*、*C. lindstromi*和*C. angulatus*等5牙形石生物带, 在*C. intermedius*带上部至*C. angulatus*带之间, 还依次出现3层笔石, 归属于重新厘定的*Rhabdinopora parabola*和*Anisograptus matanensis*等2个笔石带, 此外还有大量三叶虫和介形类化石共生, 结合高精度同位素地球化学的研究, 笔者等建议, 以全球广泛分布的牙形石*C. intermedius*的首现, 取代*Iapetognathus fluctivagus*, 作为寒武系与奥陶系界线划分对比的标志, 其层位与原来所指定的界线层几乎一致或接近, 界线之上所记录的最大碳同位素异常和首次出现的最早的浮游正笔石——*R. parabola*(含*R. praeparabola*), 可作为该界线划分的辅助标志。

关键词: 奥陶纪; 年代地层; 特马豆克阶; 划分与对比; 牙形石; 笔石

中图分类号: P 535; P534.42

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2015)05-0014-13

自1989年以来, 国际地层委员会奥陶系分会(ISOS)一直按照国际地层委员会(ICS)的建议, 致力于全球奥陶系统一或通用年代地层系统的研究, 其目标就是在对世界各地有可能成为相关年代地层单位界线层型剖面调查与研究基础上, 建立易于在全球范围内适用的奥陶系年代地层单位(即统和阶)的划分系统与对比标准^[1], 借以改变长期以来把先期建立的区域性地质年表视为全球奥陶系划分和对比的标准, 并由此引发的不同大陆之间地层对比的矛盾和混乱(表1), 以期用全球统一时间标尺和纽带, 即共同的语言, 去连接和解释不同大陆之间和地学各个学科之间的时代对比关系, 共同破译我们星

球——地球在奥陶纪时期的演变历史。该目标在历经近30多年的探索和研究后, 随着我国湖北宜昌黄花场剖面于2008年3月被国际地科联执行委员会批准和认定为奥陶系第3个阶, 即大坪阶的“金钉子”^[2-4]而成功的实现了。表1展示了全球统一或者通用的奥陶系年代地层系统与英国传统的、过去多视为对比标准的和最近修订的统或阶的对比^[5], 以及与全国地层委员会^[6]所公布的区域年代地层系统的对比; 表中的同位素年龄来自国际地层委(ICS)(2013)^[7]在网上公布的最新年龄数据。

从表1中可见, 全球通用奥陶系地质年代表系由下、中、上3个统和7个阶组成^[7-11]。它们的全

收稿日期: 2015-02-23; 改回日期: 2015-03-07。

基金项目: 中国地质调查“三峡地区代表性寒武—奥陶系界线研究(编号:1212011120142)”、科技部科技基础工作项目“吉林白山大阳岔全球寒武系与奥陶系界线金钉子候选剖面的研究(编号:2015FY310100)”项目联合资助。

作者简介: 汪啸风(1939—), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事地层古生物学研究。Email: ycwangxiaofeng@163.com。

表1 全球及中国奥陶纪年代地层划分与对比

Table 1 Global and China Ordovician chronostratigraphic classification and correlation

全球奥陶系年代地层系统				区域性奥陶系统/阶的划分		
统	阶	界线生物标志/Ma	修订的年龄/Ma ICS,2013 ^[7]	英国 Fortey et al.2000 ^[5]	中国(全国地层委, 2001) ^[6]	传统的英国的统/阶
上统	鲁丹阶 (Rhuddanian)	P. acuminatus (GSSP-Dobs Linn)	443.8±1.5 445.2±1.4	阿什极尔 Ashigill	钱塘江阶	阿什极尔 Ashigill
	郝南特阶(Hirnantian)	D. complanatus A.ordovicicus				
	凯迪阶 (Katian)	D. caudatus GSSP-Black Knob R.	453.0±0.7	卡拉道克 Caradoc	艾家山阶	卡拉道克 Caradoc
	桑比阶 (Sandbian)	N. gracilis (GSSP-Fegelsang)	458.4±0.9	兰维恩 Llanvirn	达瑞威尔阶	兰德罗 Llandeilo 兰维恩 Llanvirn
中统	达瑞威尔阶 (Darriwillian)	U. austrodentatus (GSSP-常山黄泥塘)	467.3±1.1	阿伦尼克 (Arenig)	大湾阶	阿伦尼克 (Arenig)
	大坪阶 (Dapingian)	B. triangularis (GSSP-宜昌黄花场)	470.0±11.6		道保湾阶	
下统	弗洛阶 (Floian)	T. approximatus (GSSP-Diabasbrottet)	477.7±1.4	特马豆克阶 (Tremadoc)	新厂阶	特马豆克阶 (Tremadoc)
	特马豆克阶 (Tremadocian)	I. fluctivagus? (GSSP-Green Point)	485.4±1.9			

球界线层型剖面和点位(GSSP),即“金钉子”,分别位于加拿大纽芬兰 Green Point 剖面,瑞典 Diabasbrottet 剖面,我国宜昌黄花场剖面,浙江常山黄泥塘剖面,瑞典 Fågelsång 剖面,美国俄克拉荷马州南部 Black Knob Ridge 剖面以及我国湖北宜昌王家湾北剖面。值得注意的是,“金钉子”剖面的建立仅仅为全球统一年代地层划分与对比奠定了良好的基础,但绝不意味该项研究的终结。随着对“金钉子”剖面研究的不断深入,必然引伸出一些更深层次的、以往尚未重视或意识到的问题;同时也会发现某些“金钉子”剖面,譬如西纽芬兰特马豆克阶的“金钉子”剖面和所确定的界线标志和点位并不能作为全球相关界线的对比标准,需要重新研究和解决(表1),否则,就违背了研究和建立“金钉子”的初衷。笔者结合近年来对我国寒武系与奥陶系界线的研究,联系西纽芬兰全球奥陶系下界“金钉子”剖面所暴露的问题,讨论奥陶系特马豆克阶底界的划分与对比问题。

1 全球奥陶系底界暨特马豆克阶(Tremadocian)的界线层型和点位问题

Terfelt 等^[12]最近的研究表明,由 Cooper 等^[13]

等建议、并为国际寒武系与奥陶系界线工作组 1999 年通过、国际地层委和国际地科联 2000 年批准的全球奥陶系底界暨特马豆克阶底界的金钉子剖面——加拿大纽芬兰绿岬剖面(Green Point section)所指定的界线层和点位(即绿岬组 Martin Point 段 101.8 m 处的 23 层)(Bed 23)内部,并无所指定的界线生物标志——波动古大西洋牙形石 *Iapetognathus fluctivagus* 存在,所见到的乃是其先驱 *Iapetognathus preaengensis*,该研究成果一经发表^[12],立即引起全球地质界的关注,虽然某些主张选择 *Iapetognathus fluctivagus* 的提名人仍然坚持他们原来建议的有效性^[14],并且不接受上述关于波动古大西洋牙形石在分类鉴定和层位上的问题。然而,近十多年的实践表明,选择一个刚刚建立、分布并不普遍、尤其是当时尚未经历长期实践检验的新种——*Iapetognathus fluctivagus*^[15]作为寒武系与奥陶系界线划分的生物标志,显然不够慎重,此乃是当时的国际寒武系—奥陶系界线工作组所作出的仓促且无奈选择,因为多数寒武系与奥陶系界线工作组成员,自 1974 年开始,在经历了 25 年对全球寒武系与奥陶系界线层型和点位的调查研究、反复讨论、而依然未果的情况下感到厌倦,希望尽快结束这一旷日持久的调查与讨论。因此通过重新研

究发现绿岬寒武系与奥陶系金钉子剖面在生物标志和点位方面的问题并不令人感到惊讶。实际上 Miller 本人在 1988 年^[16]的文章中就曾标出该种在北美地台上产于 *Cordylodus lindstromi* 牙形石生物带的上部,与 Terfelt 等^[12]最新研究结果一致;同时也暗示波动古大西洋牙形石 (*Iapetognathus fluctivagus*) 的产出层位受岩相控制,在分布和产出层位上是穿时的。绿岬“金钉子”剖面地层倒转,据 Terfelt 等^[12]的研究,该剖面所指定的界线标志 *I. fluctivagus* 实际上并不是出现在距底 101.8 m 处的 23 层内部^[13],而是出现在 26 层(Bed 26),较该界线划分的辅助标志——最早的浮游笔石 *Rhabdinopora praeparabola?* (= *R. parabola*) 始现层位高出 2 m 多;后者产于界线之上 4.8 m,即距底 106.4 m 处的第 25 层(Bed 25)钙质砾岩层之上的灰黑色页岩夹层之中(图 1A, 图 2)。令人感到遗憾的是,Cooper 等^[13]所指定的划分绿岬“金钉子”剖面寒武系与奥陶系界线的生物标志,即本文图 1C 所展示的牙形石标本,不包括该图中的标本 1,4,6,7 和图 1B 所展示笔石的标本(除其中的笔石标本 a-d),均非采自绿岬剖面;所展示的化学地层 $\delta^{13}\text{C}$ 异常曲线,也不是来自绿岬剖面的数据,而是 20 世纪 90 年代初依据北美长堤(Long Beach)等剖面资料所综合的曲线。值得注意的是,图 1C^[13]所展示的牙形石标本 1,4,6,7 虽采自绿岬剖面,经进一步研究表明,它们并不是所指定的界线标志 *Iapetognathus fluctivagus*,而是 *Iapetognathus preaengensis* Landing, 1981^[12];所附笔石标本图片,图 1B 所展示的笔石标本,乃是 Erdtmann^[17,18]1985 年采自绿岬剖面奥陶系最低层位,距底 106.4 m 处的笔石标本(图 3)。笔者等在 Erdtmann 教授支持下,曾对这些笔石以及挪威奥斯陆附近 Naersner 寒武系与奥陶系界线剖面所采笔石标本(图 4A, B)进行过再研究^[19],结果表明它们多系 *Rhabdinopora parabola* 的幼年复体(图 4A-C)。在绿岬剖面该层中还有个别枝细,似“Staurograptid”幼年期的笔石共生(图 4D)。另据 Azmy 等^[20]新近获得的高精度化学地层研究数据,绿岬剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 最大异常也不是发生在所指定的界线层中,而是与牙形石 *C. intermedius* 的首现层位接近,即 22 层上部(图 1A, 图 2)。

以上生物和化学地层的再研究成果遗憾的表明,纽芬兰绿岬(Green Point)寒武系与奥陶系界线

剖面并不符合全球界线层型剖面和点位,即“金钉子”剖面的要求。近 10 多年的实践还表明,作为绿岬剖面寒武系与奥陶系界线划分的生物标志,牙形石 *Iapetognathus fluctivagus* 在分类上存在巨大的分歧,在分布上也不普遍,仅限于北美地区^[12],其首现层位还可能是穿时的;另一方面,该界线划分的辅助标志——*Rhabdinopora praeparabola?*,在分类与鉴定上也需进一步研究,它们在绿岬剖面与所指定的牙形石生物标志在层序上不相吻合,而且尚难以肯定它们在该剖面产出层位确实代表奥陶纪最低层位的浮游笔石,目前还不能排除其下还有更低层位的浮游正笔石式树形笔石的出现,据此有必要对全球寒武系与奥陶系界线,即奥陶系底界的“金钉子”剖面进行重新评估。

2 我国寒武系与奥陶系界线划分与对比问题

我国存在 3 种类型的寒武系和奥陶系界线,即台地相、盆地相以及台缘-斜坡相,其中尤以台缘-斜坡相的寒武系和奥陶系界线易于划分与对比。

(1) 在我国南方,穆恩之^[21]曾建议用新厂阶一名作为我国奥陶系最低层位年代地层单位,命名剖面位于广东台山新厂。该剖面在构造古地理位置上处于华夏地块的深水盆缘或岛弧相区(图 5),自下而上被划分为 *Staurograptus-Anisograptus* (X1), *Aletograptus-Triograptus* (X2) 和 *Adelograptus-Clonograptus* (X3) 等 3 个笔石带,与原始含义的特马豆克阶对比。嗣后的研究表明^[22,23],在该剖面寒武系与奥陶系界线间隔中,笔石序列不完整,穆恩之^[21]所划分 X1 并非代表奥陶系最低层位的浮游笔石组合,在 X1 之下和 X3 之上均缺乏连续的笔石系列证据,其时限难以准确限定,故此笔者等在新编的全国区域地质年表中,采用国际通用的用特马豆克阶一名取代区域性“新厂阶”,以便于我国奥陶系底界,即寒武系与奥陶系界线的精确划分和全球对比。

在我国南方扬子地块台缘-斜坡相的寒武系与奥陶系界线剖面中,Dong 等^[24]曾报道在湘西桃源瓦尔岗剖面奥陶系底部盘家嘴组 *Cordylodus lindstromi* 牙形石带上部发现 *Iapetognathus fluctivagus*,较绿岬“金钉子”剖面所限定的该种的点位高。由于作者的文章中未标出该化石的图片和进

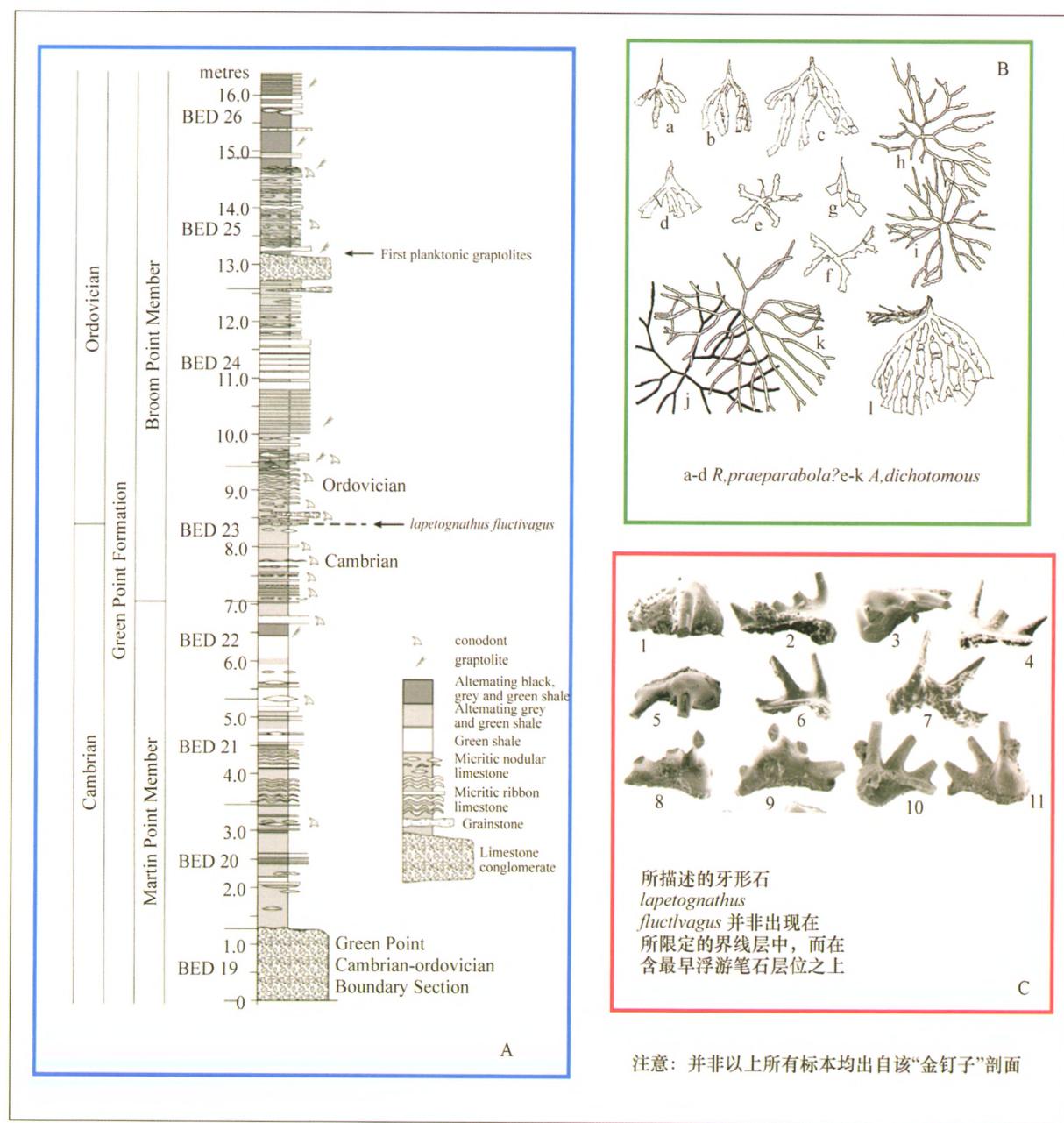


图1 绿岬剖面柱状图和所标注的寒武系与奥陶系界线划分的生物标志、辅助标志及其产出层位(据 Cooper^[13])

Fig. 1 The column of the Green Point section and its bio-markers and auxiliary sign indicated for defining the Cambrian-Ordovician boundary and their horizon (after Cooper^[13])

行剖面描述,因而无法肯定该种在瓦尔岗剖面中的具体产出层位;如果化石鉴定无误,瓦尔岗剖面寒武系与奥陶系界线则应置于 *Cordylodus lindstromi* 带及其下伏产三叶虫 *Hysterocheilus* 的层位之下,精确位置还需进一步研究。此外,在湖南常德、桃江,江西武宁等地亦有属扬子地块江南台缘-斜坡相的寒武/奥陶系界线剖面出露。2013年本文前两位作者与 Bagnoli G. 等曾对常德里公岗剖面进行了牙形

石采样和分析,但化石稀少,值得进一步注意。在湖南桃江^[25]和江西武宁^[26]奥陶系最下部均发现有划分奥陶系底界的辅助标志 *Rhabdinopora parabola* (= *R. praeaparabola*) 存在,相比之下,江西武宁剖面易于揭露,进一步工作后有可能发现位于其下的奥陶纪最低层位的牙形石。Wang 和 Wang^[19]曾对金玉琴、汪啸风^[25]所报道的湖南桃江白水溪组底部所发现笔石再研究后指出, *R. praeaparabola* 与他



图 2 西纽芬兰绿岬全球寒武系与奥陶系界线层型剖面的层序与问题

(据 Cooper et al., 2000^[13], Terfelt et al., 2012^[12]修订)

Fig. 2 Sequences and problems of the GSSP for the Cambrian-Ordovician boundary at the Green Point section, West Newfoundland (Modified from Cooper et al., 2000^[13], Terfelt et al., 2012^[12])

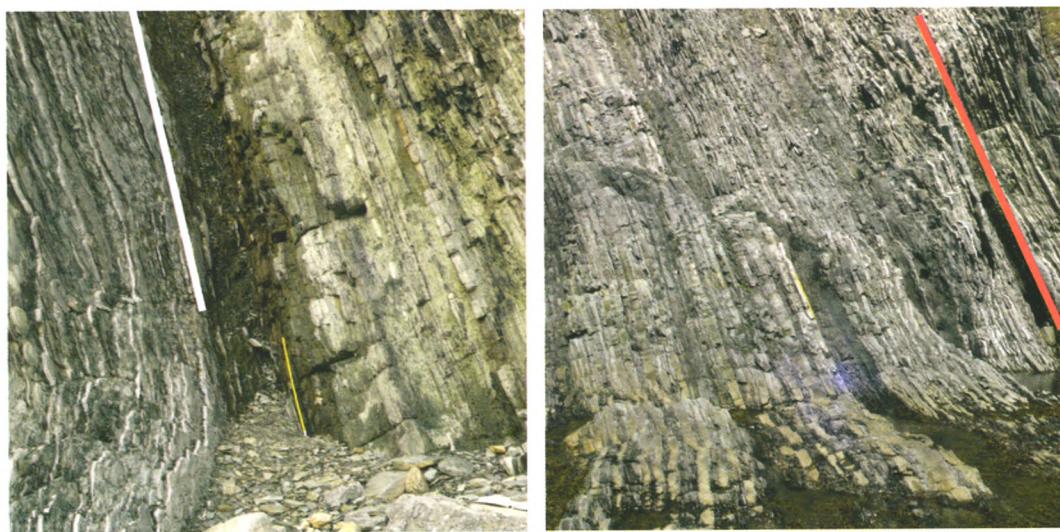


图 3 左图白线示纽芬兰绿岬剖面 23 层 GSSP 的具体层位;右图红线示该剖面 25 层 (Bed 25)
上部(106.4 m 处)黑灰色页岩夹层中产最早浮游正笔石的层位

Fig. 3 Left white line shows Bed 23, the specific horizon of the GSSP of the Green Point section, Newfoundland; right red line shows the 106.4 m level in upper part of the Bed 25 of the section which composed of dark gray shale inter-bedding with the earliest planktonic graptolites

们所描述的 *Rhabdinopora taojiangensis* 同义, 但后者命名在前。现在看来此两者均应归属于 *Rhabdinopora parabola* 的幼年期类型。在白水溪组与该种

共生的还有个体细小、原鉴定为“*Staurograptus*”的笔石, 看来也是 *Rhabdinopora parabola* 的幼年期复体, 所描述的差异实际上系受压和保存方向所致。

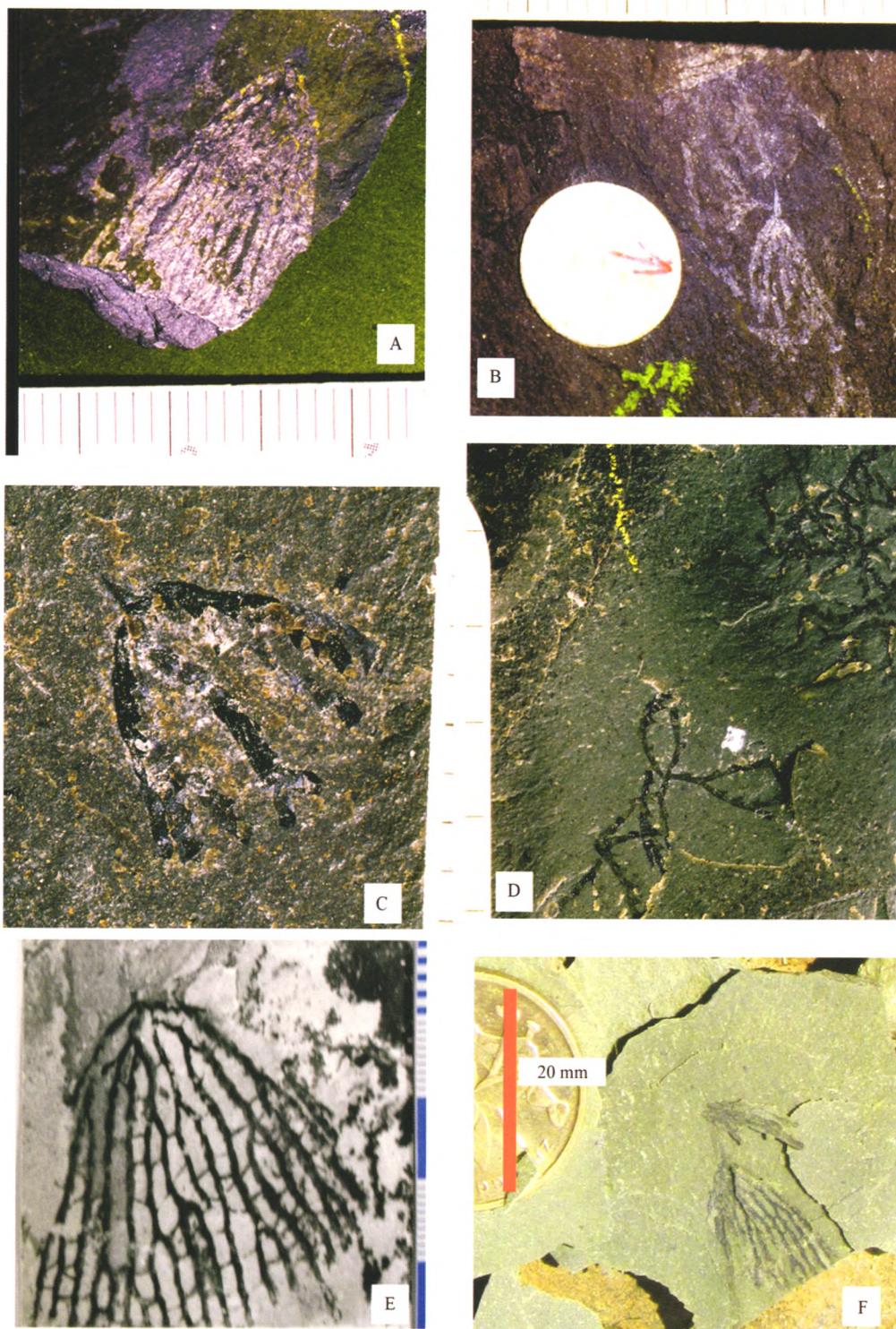


图 4 A - B. 采自奥斯陆附近 Naersner 剖面的 *Rhabdiopora praeparabola* (=*R. parabola* 的幼年期复体); C - D. 加拿大绿岬剖面 106.4 m 处所发现的最低位的浮游笔石; C. *Rhabdiopora praeparabola* (=*R. parabola* 的幼年期复体); D. cf. "Staurograpys" sp.; E - F. 白山大阳岔小洋桥剖面奥陶纪最低层位的 *Rhabdinopora parabola* (= *R. praeparabola*), E. 成年期附体, F. 幼年附体(比例尺与钱币:20 mm)

Fig. 4 A - B. *Rhabdiopora praeparabola* (= *R. juvenile rhabdosome of R. parabola*), taken from the Naersner profile in Oslo nearby; C - D. The lowest Ordovician planktonic graptolites found at 106.4 m level of the Green point section, Canada; C. *Rhabdiopora praeparabola* (= *R. juvenile rhabdosome of R. parabola*), D. cf. "Staurograpys" sp.; E - F. *Rhabdinopora parabola* (= *R. praeparabola*) collected from the lowest Ordovician beds of Xiaoyangqiao section, E. adult rhabdosome, F. young rhabdosome (scale and coins: 20 mm)

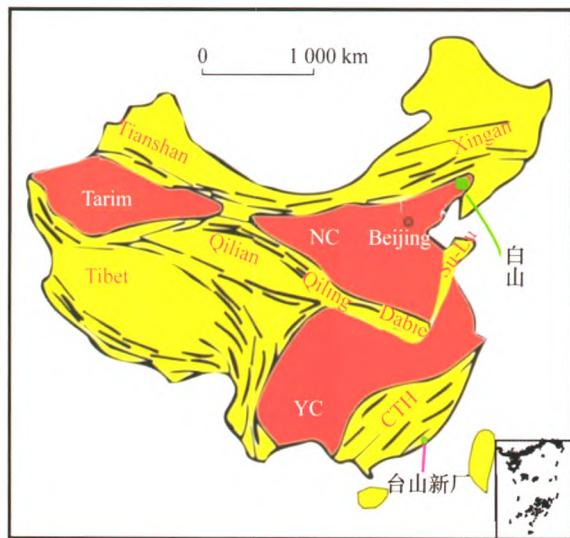


图 5 中国奥陶纪构造 – 古地理轮廓及吉林白山
大阳岔剖面古地理位置

Fig. 5 The Ordovician tectono-paleogeographic outline in China with paleogeographic location of the Dayangcha section, Baishan, Jilin

NC 华北(中朝)地块、Tarim(塔里木)地块、YC(扬子)和 CTH(华夏)地块。海南岛作为漂移地体当时可能属海南 – 印支地块陆缘区一部分,西藏可能属掸泰(或滇缅马泰)地块陆棚区一部分;
天山 – 兴安分属西伯利亚和哈萨克斯坦板块陆缘的一部分
NC North China (Sino-Koren) block, Tarim block, YC (Yangtze) and Cathaysia Blocks. Hainan Island as drift terrane would belongs to the continental margin of Hainan-Indochina block; Tibet may be one part of continental shelf of the Shan-Tai (or Subumasu) block; Tian shan-Xing'an region might belong to parts of continental margin of the Siberia and Kazakhstan plates

此外,浙江江山—常山一带奥陶系底界的确切的位置,究竟应划在印诸埠组下部或是西阳山组顶部,还需要进一步研究。

我国南方扬子碳酸盐岩台地相的奥陶系下界多划在湖北宜昌黄花场剖面西陵峡组 *Hirsutodontus simplex* 之下^[27], 后者与 *Cordylodus intermedius* 带下部相当,较 Terfelt 等^[12]厘定后的真正的 *I. fluctivagus* 首现层位低。有鉴于此,在全球奥陶系下界的点位尚未重新厘定之前,宜昌黄花场剖面奥陶系底界大致落在西陵峡组上部。

目前华夏地块边缘岛弧或盆地相奥陶系下界多划在八村群顶部或赣南崇义爵山沟组 *Staurograptus* 笔石带底部,前者缺少化石证据,后者的界线可能较标准的奥陶系下界高一些,确切的界线位置尚需进一步研究。

(2) 与上述我国南方所发现的寒武系与奥陶系

界线剖面相比,我国北方吉林白山江源(即原浑江)大阳岔小洋桥寒武系与奥陶系界线剖面发育最好(图 6, 图 7),研究也最为详细^[28–31],在奥陶系与寒武系界线间隔中生物序列完整。Wang 等^[31,32]和 Chen 等^[29]都曾建议用浑江阶一名取代“新厂阶”作为我国区域奥陶系最下部年代地层划分与对比的标准,其与下伏寒武系的界线曾建议定在牙形石 *Codylodus intermedius* 生物带或 *C. lindstromi* 底部^[29]。前者位于小洋桥剖面产最低层位(BD27)浮游笔石 *Rhabdinopora parabola* (含 *R. praeparabola*)生物带的黄绿色页岩(图 6 D – E)之下 3.8 m 左右(22 层底部)(图 7);后者位于该笔石带之下 2.23 m^[28,29]。

除吉林大阳岔小洋桥寒武系与奥陶系界线剖面外,在华北地块上出露较好的寒武系—奥陶系界线剖面主要分布在唐山和辽西太子河一带。根据与大阳岔小洋桥剖面的对比,唐山赵阁庄和辽西太子河等地寒武/奥陶系界线应从原先所划分的治里组 *Rhabdinopora flabelliformis* 带底部,下移至原视为寒武纪三山子组底部(山西)或原凤山阶炒米店组顶部(河北—山东)。根据 Zhou 等^[33]所提出的华北地台 *Codylodus lindstromi* 牙形石生物带下部与相关三叶虫生物带的关系及其与小洋桥剖面牙形石、笔石和三叶虫生物带的对比,华北地台寒武系与奥陶系的界线似应置于 *Pseudokoldiniodia perpeltis* (即原 *Missisquoia perpeltis*) 带和 *Yosimuraspis* 带之间,后者在小洋桥剖面最早见于含最低层位浮游笔石 *Rhabdinopora parabola* (含 *R. "praeparabola"*) 的黄绿色页岩之上 30 cm,较 *Codylodus intermedius* 牙形石生物带高 4.1 m^[28,29]。

在塔里木地块,属于深水斜坡 – 盆地相寒武系与奥陶系界线以新疆霍城果子沟剖面为代表^[34],界线应划在该地新二台组下部三叶虫 *Hysterolenus* 带底部,与大阳岔剖面 *Codylodus intermedius* 生物带下部大致相当。

塔里木地块台缘斜坡相的寒武系与奥陶系界线,以新疆柯坪大湾沟剖面蓬莱坝组研究较好,该剖面保存了较完整的特马道克期牙形石生物带。据周志毅等^[35,36]、陈旭等^[37]、张师本等^[38,39]的研究,自下而上分为 *Monocostatus sevierensis* 带, *Chosonodina herfurthi* – *Rossodus manitouensis* 带, *Glyptoconus quadraplicatus* 带和 *T. proteus* – *P. deltifer* 带牙形石,易于与特马豆克阶对比,那里的寒武系



图 6 吉林白山江源县大阳岔小洋桥寒武系与奥陶系界线剖面

Fig. 6 The Xiaoyangqiao Cambrian-Ordovician boundary section near Jiangyuan, Baishan, Jilin

A. 白山江源大阳岔小洋桥寒武系与奥陶系界线剖面; B. 含*Anisograptus matanensis* 带笔石的灰绿色薄层粉砂质页岩; C. 产最低层位浮游正笔石*R. parabola* (含*R. praeparabola* 黄绿色页岩(Bed 27)); D. 示产最低层位浮游正笔石与所建议的寒武系—奥陶系界线间的地层, 铁锤处为 25 层(Bed 25); E. 小洋桥寒武系—奥陶系界线剖面界线上下的地层, 黄线示界线接近 22 层底部(Bed 22)

A. Xiaoyangqiao Cambrian-Ordovician boundary sections near Jiangyuan, Baishan; B. Indicating the gray green thin-bedded salty shale bearing graptolites of the *Anisograptus matanensis* Zone; C. Showing the horizon bearing the lowest Ordovician planktonic graptolites *R. parabola* (with *R. praeparabola*) in yellow-green shale interbeds(Bed 27); D. The photo shows the strata between the beds with the lowest Ordovician planktonic graptolites and the Cambrian-Ordovician boundary proposed, the locality with a hammer is Bed 25; E. The Xiaoyangqiao Cambrian-Ordovician boundary suggested and closed to the lowest Bed 22 indicated by a yellow line

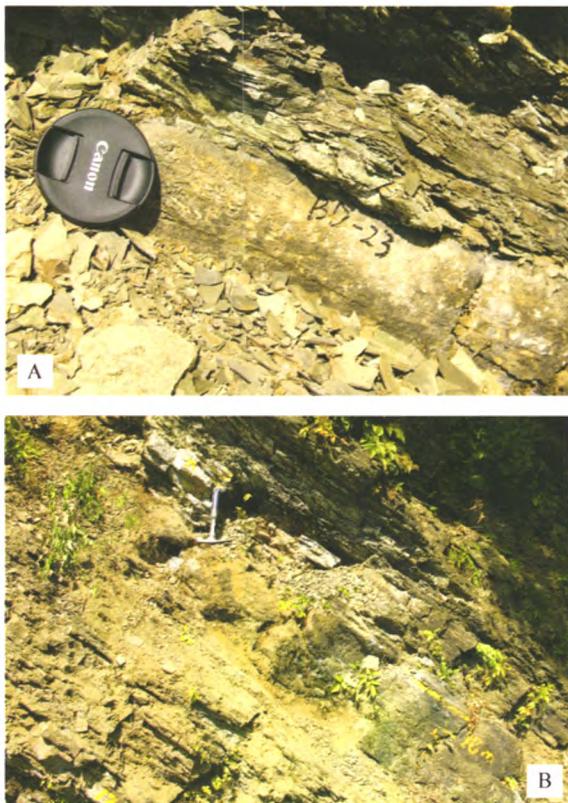


图 7 小洋桥寒武系—奥陶系界线地层

Fig. 7 Xiaoyangqiao Cambrian-Ordovician boundary interval

A. 示所建议的寒武系—奥陶系界线之上的页岩夹薄层灰岩 (BD23); B. 界线位于 22 层底部, 以 *Cordylodus intermedius* 首次出现为标志, 铁锤与黄线示初步确定的界线位置

A. Yellow green shale with thin bedded limestone (Bed 23) above the boundary suggested; B. The Cambrian-Ordovician boundary defined by the FAD of *Cordylodus intermedius* close to the lowest Bed 22. hammer and yellow line showing the boundary preliminary determined

与奥陶系界线似应置于 *Monocostatus sevierensis* 带之下。

3 小洋桥剖面——全球寒武系与奥陶系界线层型候选剖面

吉林浑江大阳岔小洋桥(原称小阳桥)寒武系与奥陶系界线剖面位于小洋桥国家重点古生物化石保护区内(图 6, 图 7), 距白山市(原浑江)57 km, 江源县约 10 km, 大阳岔镇 2.5 km($42^{\circ}3'40''N$, $126^{\circ}42'25''E$, 属长白山脉西延部分, 海拔 650 m, 交通方便。剖面沿山边小溪出露完美、地层连续、环境优美、各门类化石丰富、研究详细^[28-32, 40])。在

1992 年澳大利亚悉尼举行的国际奥陶系讨论会上, 与加拿大纽芬兰绿岬寒武系—奥陶系界线剖面一起, 均被奥陶系分会列为全球奥陶系底界界线层型候选剖面之一。基于纽芬兰绿岬寒武系—奥陶系“金钉子”剖面的上述问题, 为了重新评估全球寒武系与奥陶系界线划分, 笔者等最近与吉林大学地层古生物中心的同行们一起, 又对小洋桥剖面和绿岬剖面进行了详细的对比研究。小洋桥剖面形成于华北克拉通北东台缘浪基面以下外陆棚较深水环境, 寒武系与奥陶系界线地层系由一套具连续韵律的黑色、黄绿色、灰紫色页岩与灰色薄层瘤状或碎屑灰岩互层组成, 在岩相和沉积环境方面与加拿大纽芬兰绿岬(Green Point)剖面相似, 但海水相对较浅, 在界线间隔中二者均产完整牙形石、笔石系列, 但小洋桥剖面所含化石的丰度和多样性更高, 共生的还有大量三叶虫、介形类化石。在所详细测量的厚 34 m 的寒武系与奥陶系界线地层中(即从 *Cordylodus proavus* – *C. angulatus* 牙形石生物带底部)(图 6, 图 7), 自下而上可以识别出 *Cam-brostodus*、*Cordylodus proavus*、*C. intermedius*、*C. lindstromi* 和 *C. angulatus* 等 5 牙形石生物带^[28]; 通过对 *C. intermedius* 牙形石带上部依次发现 3 层笔石的详细采集和研究表明, 此 3 层笔石应归属于重新厘定的 *Rhabdinopora parabola* 和 *Anisograptus matanensis* 等两个笔石带中^[30, 31](表 2)。根据对 Erdtmann^[17, 18] 最初从绿岬剖面、挪威奥斯陆附近 Naersner 剖面所采笔石标本的再研究(图 1A–D), 以及对小洋桥剖面原划为 *R. praeparabola*? 笔石带所发现笔石的研究, 并与我国湖南桃源九溪^[25]相当层位笔石群的对比, 笔者等认为, *R. praeparabola* 与 *R. parabola* 应属同一个生物种群, 尤其是在小洋桥剖面原划为最低层位的 *R. praeparabola* 带中亦发现大量 *R. parabola* 存在, 因而不应分割为两个笔石生物带, 尽管在小洋桥剖面此两层之间存在大约 5 m 的间距; 另外, 系统分类的研究表明, *R. praeparabola* 与 *R. parabola* 在笔石体始部发育上完全一样, 均属于胎管顶端具线管、营假浮游生活的下垂式树形笔石类, 它们的始部均由 3 个原始枝组成、呈 4 分(quadriradiate)的发育形式(图 4 C, E, F), 不同之处仅在于前者个体较小, 横耙较少, 这正好暗示 *R. praeparabola* 乃是 *R. parabola* 未成熟的幼年期类型。此外, 金玉琴、汪啸

表2 我国寒武与奥陶系界线划分及主要生物带对比

Table 2 Cambrian-Ordovician boundary subdivision in China and correlation of its principal bio-zones

系	中国						加拿大	
	华北地块		扬子地块			华夏地块	西纽芬兰	
	大阳岔小洋桥剖面		三峡 克拉通台地	湖南—江西 (台缘斜坡)		广东台山 (陆缘弧地)	绿岬 (Green Point)	
奥陶系	牙形石 ⁽²¹⁻²²⁾	笔石	牙形石	牙形石	笔石	笔石	牙形石 ⁽¹²⁻¹⁴⁾	笔石
	<i>Cordylodus angulatus</i>	<i>Anisograptus matanensis</i>	<i>Cordylodus angulatus</i>	<i>Cordylodus angulatus</i>	<i>Anisogr. matanensis</i>	<i>Anisograptus matanensis</i>	<i>Cordylodus angulatus with lapetognathus? fluctivagus</i>	<i>Anisograptus matanensis</i>
	<i>Cordylodus lindstromi</i>	<i>Rhabdinopora parabola</i>		<i>Cordylodus lindstromi</i>	<i>Rabdinop. parabola with "prae-parabola"</i>	<i>(no fossils found)</i>	<i>Cordylodus lindstromi</i>	<i>Rhabdinopora praeparabola-R.parabola As. with "staurogr."</i>
		<i>R.praeparabola-parabola</i>		<i>Cordylodus intermedius/H.simplex</i>			<i>Cordylodus intermedius with lapetognathus preaengensis</i>	
	<i>Cordylodus proavus</i>		<i>Cordylodus proavus</i>				<i>Cordylodus proavus</i>	
	<i>Cambrostodus</i>		<i>Eoconodontus</i>	<i>Eoconodontus</i>			<i>(no zoned)</i>	
寒武系								

风^[25]曾经报道的 *Rhabdinopora taojiangensis* 和 *Staurograptus* sp. 也应归属于 *R. parabola* 种群之中的幼年期类型。加拿大纽芬兰绿岬剖面上所报道的 *R. praeparabola* 系 Erdtmann^[17,18] 1985 年从该剖面 106.4 m 透镜状灰岩之上的一单层页岩夹层中所采的标本(图 4 C, D), 亦应属于 *R. parabola* 的未成年类型。*Rhabdinopora parabola* (包括 *R. praeparabola* 与 *R. parabola*) 首现于大洋岔小洋桥剖面 *Cordylodus intermedius* 带顶部, 并上延至 *Cordylodus lindstromi* 牙形石带; 在上层 *R. parabola* 笔石群之上 2.5 m 的薄层泥质粉砂中产大量 *Anisograptus matanensis* 带的笔石, 层位与 *C. angulatus* 牙形石带相当。Chen 等^[29]曾报道上述最低层位的 *Rhabdinopora parabola* (包括 *R. praeparabola* 与 *R. parabola*) 首现层位较 *C. intermedius* 牙形石带底界高 5.28 m, 但据其插图 2 所示, 二者之间的厚度不超过 3.5 m, 因此有关它们之间的确切厚度还需进一步确定。

与绿岬剖面相同, 小洋桥剖面 *Cordylodus intermedius* 带中即无牙形石 *Iapetognathus fluctivagus* 存在, 所发现的乃是与其密切相关的 *Iapetognathus jilinensis*, 产出层位与最低层位的 *R. parabola* 相当。考虑牙形石 *Cordylodus intermedius* 在全球分布广泛, 它们首现层位与所指定特马豆阶下界 GSSP 层位

几乎一致或接近, 其下部还与广泛分布的牙形石 *Hirsutodontus simplex* 共生, 因而易于在全球识别和对比。陈均远等^[41]对小洋桥剖面碳同位素和稀有元素及稀土元素钇(Y)、铈(Sr)、铬(Cr)等进行了详细的地球化学研究, 结果表明它们的最大正异常均主要发生在 *Hirsutodontus simplex* 带, 即本文的 *Cordylodus intermedius* 牙形石带下部, 与加拿大绿岬剖面新近获得的高精度地球化学结果基本一致^[20]。Jing 等^[42]曾对我国塔里木柯坪地区寒武系与奥陶系界线地层, 蓬莱坝组的碳同位素异常进行了研究, 其结果表明, 最大的碳同位素正异常亦发生在 *Hirsutodontus simplex* 带上部, 与小洋桥剖面一致。

综上所述, 笔者同意 Terfelt 等^[12] 和 Azmy 等^[20]最近的建议, 以牙形石 *C. intermedius* 的首次出现(FAD)作为全球以及我国奥陶系下界的划分标志; 在小洋桥剖面, 该界线生物层之上所出现的笔石 *Rhabdinopora parabola* 可作界线划分的辅助标志。牙形石 *Cordylodus lindstromi* 虽然也曾考虑作为寒武系与奥陶系界线划分标志, 但与 *C. intermedius* 相比, 该种在分类上还有争议, 产出层位与地球化学异常的层位也不相吻合。在我国南方, 如扬子碳酸盐岩台地, 有的地方可能没有发现 *C. intermedius*, 但 *H. simplex* 带常见, 可以后者底界为划分标准, 层位与 *C. intermedius* 带底界基本一致。

(表2)。

4 结语

基于对全球寒武系与奥陶系界线层型剖面和点位(GSSP, 即俗称的“金钉子”)以及我国有代表性的寒武系与奥陶系界线剖面的对比研究指出, 国际地层委和国际地科联所批准的加拿大西纽芬兰绿岬剖面^[13], 在经历了10多年检验后发现, 在该剖面的界线层和点位中并无所指定的划分寒武系与奥陶系界线的生物标志存在, 理应进行重新选择和厘定。我国吉林白山大阳岔小洋桥剖面曾经是全球寒武系与奥陶系界线层型剖面和点位(GSSP)最具代表性的候选剖面之一, 交通方便, 地层出露完美, 并发育了完整、丰富、多样和易于全球识别与对比的牙形石和笔石序列, 并有三叶虫、介形类化石共生。

建议以小洋桥剖面冶里组底部牙形石 *Cordylo-dus intermedius* 的首现(FAD)作为我国、乃至全球寒武系与奥陶系界线划分的生物标志; 界线附近所出现的地球化学异常, 以及界线之上所出现的以 *R. parabola* 为代表的最早浮游笔石可作为该界线划分的辅助标志; 所建议的界线标志易于在全球识别和对比。我国南方和北美大陆奥陶系底部常见的牙形石 *Hirsutodontus simplex* 生物带底部与 *C. intermedius* 带底部基本相当。

致谢:衷心感谢吉林省国土资源局环境处、白山市和江源区国土资源局领导和同仁对该项研究的支持和帮助, 在野外工作期间, 承蒙吉林大学地层古生物研究中心孙春林教授的指导与帮助、郎嘉彬博士参与野外工作, 在此一并致谢。本文作者之一(汪啸风)还要感谢 Erdtmann B D 教授慷慨提供他所采的有关标本和图片。

参考文献:

- [1] Webby B D. Steps toward a global standard for Ordovician stratigraphy [J]. Newsletter on Stratigraphy, 1998, 1: 1–33.
- [2] Wang X F, Svend S, Bernd D. E, et al. A proposed GSSP for the base of the Middle Ordovician Series: the Huanghuachang section, Yichang, China [J]. Episodes, 2005, 28(2): 105–117.
- [3] Wang X F, Svend S, Chen X H, et al. Dapingian Stage: standard name for the lowermost global stage of the Middle Ordovician Series [J]. Lethaia, 2009, 42 (3): 377–380.
- [4] Wang X F, Svend S, Chen X H, et al. The Global Stratotype Section and Point for the base of the Middle Ordovician Series and the Third Stage (Dapingian) [J]. Episodes, 2009, 32 (2): 96–113.
- [5] Fortey R A, Harper D A, Ingham J K, et al. A revised correlation of Ordovician rocks in the British Isles [J]. The Geological Society Special Report, 2000, 24: 1–83.
- [6] 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明书 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1–59.
- [7] Cohen K M, Finney S, Gibbard P L. Geological Time scale [J]. 地层学杂志, 2013, 37(3): 附表 1–2.
- [8] Finney S C. Global Series and Stages for the Ordovician System: a progress report [J]. Geologica Acta, 2005(3): 309–316.
- [9] Bergström S M, Chen X, Guttierrez-Marco J C, et al. The new chronostratigraphic classification of the Ordovician System and its relations to major regional series and stages and $\delta^{13}\text{C}$ chemostratigraphy [J]. Lethaia, 2008, 42(1): 97–107.
- [10] 陈旭, 周志毅. 奥陶系全球界线层型剖面和点位(GSSP)的研究 [J]. 地层学杂志, 2005, 29(2): 165–170.
- [11] Zhan R B, Jin J S. Aspects of recent advances in the Ordovician stratigraphy and palaeontology of China [J]. Palaeoworld, 2008, 17: 1–11.
- [12] Terfelt F, Bagnoli G, Stouge S. Re-evaluation of the conodont Iapetognathus and implications for the base of the Ordovician System GSSP [J]. Lethaia, 2012, 45: 227–237.
- [13] Cooper R A, Nowlan G S, Williams S H. Global Stratotype Section and Point for base of the Ordovician System [J]. Episodes, 2000, 24(1): 19–28.
- [14] Miller J F, Repetski J, Nicoll R S, et al. The conodont Iapetognathus and its value for defining the base of the Ordovician System [M] // Lindskog A, Mehlqvist K. Proceedings of the 3rd IGCP 591 Annual Meeting. Lund, Sweden, 2013: 215–216.
- [15] Nicoll R S, Miller J F, Nowlan G S, et al. Iapetonudus (new genus) and Iapetognathus Landing, unusual earliest Ordovician multielement conodont taxa and their utility for biostratigraphy [J]. Brigham Young University Geology Studies, 1999, 44: 27–101.
- [16] Miller J F. Conodont as biostrigraphic tools for redefinition and correlation of the Cambrian-Ordovician boundary [J]. Geological Magazine, 1988, 125 (4): 349–362.
- [17] Erdtmann B D. Early Ordovician eustatic cycles and their bearing on punctuations in early nematophorid (planktic) graptolite evolution [M] // Walliser O H. Lecture Notes in Earth Sciences. Global Bioevents. 1986: 139–152.
- [18] Erdtmann B D. The earliest Ordovician nematophorid graptolites: taxonomy and correlation [J]. Geological Magazine, 1988, 125(4): 327–348.
- [19] Wang X F, Wang C S. The Tremadoc (Ordovician) graptolite diversification events [J]. Alcheringa, 2001, 25: 155–168.
- [20] Azmy K, Stouge S, Brand U, et al. High-resolution chemostratigraphy of the Cambrian-Ordovician GSSP: Enhanced global

- correlation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 409: 135 – 144.
- [21] 穆恩之. 正笔石及正笔石式树形笔石的演化、分类和分布 [J]. 中国科学, 1974, 2: 175 – 183.
- [22] 汪啸风, 刘义仁, 周国强. 广东台山早奥陶世新厂组笔石 [J]. 古生物学报, 1979, 18(5): 493 – 504.
- [23] Li J J, Ge M Y, Chen X. Xinchangian (Early Ordovician) anisograptid fauna from Taishan, Guangdong [J]. *Palaeontologia Cathayana*, 1985, 2: 103 – 135.
- [24] Dong X P, Repetski J E, Bergström S M. Conodont biostratigraphy of the Middle Cambrian through lowermost Ordovician in Hunan, South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78: 1185 – 1260.
- [25] 金玉琴, 汪啸风. 湘中白水溪组笔石群的发现和桥亭子组的多枝笔石 [M]//中国地质科学院地层古生物论文集编委会. 地层古生物论文集. 第三辑. 北京: 地质出版社, 1977: 74 – 85.
- [26] 俞建华, 刘怀宝, 方一亭. 江西修水流域新厂期(早奥陶世)反称笔石科 [J]. 古生物学报, 1984, 23(5): 532 – 542.
- [27] 曾庆銮, 倪世钊, 徐光洪, 等. 长江三峡东部地区奥陶系划分与对比 [J]. 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊, 1983, 6: 1 – 68.
- [28] Chen J Y. Aspect of Cambrian-Ordovician boundary in Dayangcha, China [M]. Beijing: China Prospect Publishing House, 1986: 1 – 406.
- [29] Chen J Y, Qian Y Y, Zhang J M, et al. The recommended Cambrian-Ordovician global boundary stratotype of Xiaoyangqiao section (Dayangcha, Jilin Province), China [J]. *Geological Magazine*, 1988, 135(4): 415 – 444.
- [30] Zhang Y D, Erdtmann B D. Tremadocian (Ordovician) biostratigraphy and graptolites at Dayangcha (Baishan, Jilin, NE China) [J]. *Paläontologische Zeitschrift*, 2004, 78(2): 323 – 354.
- [31] Wang X F, Erdtmann B D. Zonation and correlation of the earliest Ordovician graptolites from Hunjiang, Jilin Province, China [J]. *Bulletin of Geological Society of Denmark*, 1987, 35(3/4): 237 – 245.
- [32] Wang X F, Chen X H, Erdtmann B D. Ordovician chronostratigraphy—A Chinese approach [M]//Webby B D, Lauritsen J R. *Global Perspectives on Ordovician Geology*. Rotterdam: Balkema, 1992: 35 – 55.
- [33] Zhou Z Y, Wang Z H, Zhang J M, et al. Cambrian-Ordovician boundary sections and the proposed candidate for stratotype in North and Northeast China [M]// *Stratigraphy and Palaeontology of Systematic Boundaries. Cambrian-Ordovician boundary (2)*. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 1984: 1 – 62.
- [34] 汪啸风, 陈旭, 陈孝红, 等. 中国地层典——奥陶系 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1 – 126.
- [35] 周志毅, 林焕令. 西北地区地层、古地理和板块构造 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1995: 1 – 299.
- [36] 周志毅. 塔里木盆地各纪地层 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1 – 359.
- [37] 陈旭, 林焕令, 许汉奎, 等. 新疆西北部早古生代地层 [J]. 地层学杂志, 1998, 22(4): 241 – 251.
- [38] 张师本, 高琴琴. 塔里木盆地震旦纪至二叠纪地层古生物 (II). 柯坪 – 巴楚分册 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 1 – 115.
- [39] 张师本. 塔里木盆地周缘地层考察指南 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1 – 280.
- [40] 赵祥麟, 林尧坤, 张舜新. 吉林浑江地区奥陶纪新厂阶笔石序列 [J]. 古生物学报, 1988(2): 188 – 204.
- [41] 陈均远, 张俊明, 尼柯尔 R S, 等. 中国大阳岔寒武 – 奥陶系界线地层碳酸盐岩碳、氧同位素及其与牙形石演化序列相关性 [J]. 古生物学报, 1995, 14(4): 392 – 409.
- [42] Jing X C, Deng S H, Zhao Z J, et al. Carbon isotope composition and correlation across the Cambrian – Ordovician boundary in Kalpin Region of the Tarim Basin, China [J]. *Sci China Earth Science*, 2008, 51: 1317 – 1359.

On the Problem of Global Ordovician Lower Boundary “Golden Spike” and Tremadocian Subdivision and Correlation in China

WANG Xiao-feng¹, STOUGE Svend², MALETZ Jörg³, WANG Chuan-shan¹, YAN Chun-bo¹

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan, Hubei 430205, China; 2. Natural History Museum of Denmark, University of Copenhagen University, Copenhagen, Denmark; 3. Institute of Geology, Free University of Berlin, Germany)

Abstract: Correlative studies of the Cambrian and Ordovician global boundary stratotype section and point (GSSP)-western Newfoundland Green Point section with the former GSSP candidate for the Cambrian and Ordovician boundary, Xiaoyangqiao section in Dayangcha, Baishan (formerly Hunjiang), Jilin, China indicate that the conodont species *Iapetognathus fluctivagus* is not present in the specified boundary layer and point at Green Point section (i. e. Bed 23), and it is a disputed species both in distribution and taxonomy. The most of the conodont

and graptolite specimens as well as carbon and oxygen isotopic data submitted in the original proposal, unfortunately, are not from the "Golden Spike" section. This is totally incompatible with the principles and requirement for selecting GSSP and necessary for reassessment. The Xiaoyangqiao Cambrian-Ordovician boundary section is easy accessibility and well-exposed along beautiful rivulet. The Cambrian-Ordovician boundary interval is comprised of unmetamorphic deep water black, grey and green shale intercalated with thin-bedded gray nodular limestone, bearing complete and well represented conodont and graptolite succession from uppermost Cambrian to lowest Ordovician. In 34 m interval, 5 conodont biozones can be recognized in ascending order: the *Cambrostodus*, *Codylodus proavus*, *C. intermedius*, *C. lindstromi* and *C. angulatus* and in turn three graptolite-bearing beds, referred to 2 graptolite biozones, the *Rhabdinopora parabola* biozone with *R. "praeparabola"* and the *Anisograptus matanensis* biozone from the upper *C. intermedius* to *C. angulatus* conodont biozones. There are also a plenty of trilobite coexisting with ostracoda fossils. Combining high-resolution carbon and oxygen isotope studies the present authors suggest that the Cambrian-Ordovician boundary would be better to be defined by the first appearance (FAD) of widespread conodont *C. intermedius*, instead of the FAD of the controversial and rare *Iapetognathus fluctivagus* as boundary biomarker for the base of the Ordovician System. This boundary proposed, however, is close-if not identical-to the level specified at the GSSP section and easily recognized and correlated anywhere in the world. The maximum carbon isotopic excursion recorded above the boundary layer and appearance of the earliest planktonic graptolites—*R. parabola* (including *R. "praeparabola"*), can be make as an auxiliary signs for determination of the boundary.

Key words: Ordovician; chronostratigraphy; Tremadocian; subdivision and correlation; conodont; graptolite