

寒武纪全球板块构造与古地理环境再造

周肖贝^{1,2}, 李江海^{1,2}, 王洪浩^{1,2}, 李文山^{1,2}

(1 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室; 2 北京大学石油与天然气研究中心)

摘要 基于古地磁数据对寒武纪全球古板块进行再造, 并叠加更新的寒武纪全球大地构造背景和岩相古地理分布等要素, 编制了寒武纪全球古板块再造图、古地理图、全球岩相及烃源岩分布图。寒武纪全球板块以冈瓦纳超大陆、劳伦古陆、西伯利亚板块和波罗的板块为主, 多集中位于南半球, 冈瓦纳超大陆快速向南漂移, 其他板块主要向北漂移, 并伴随逆时针旋转。寒武纪整体处于海平面及温度的上升时期, 全球板块多为陆表海环境, 有利于早寒武世的富有机质沉积, 为寒武纪生命大爆发提供了良好条件。但此时气候带梯度不高, 干旱气候带广泛分布, 下—中寒武统多蒸发盐岩。冈瓦纳超大陆北部主要为碳酸盐岩沉积, 南部多为砂岩沉积, 东部边缘多火山活动, 在中部的西侧边缘地区碳酸盐岩沉积和砂岩沉积物中一般有良好的油气和烃源岩。劳伦古陆沉积具有环带特征, 其外侧为碳酸盐岩沉积。西伯利亚板块早—中寒武世主要以巨厚的膏盐岩沉积为主, 晚期沉积仅为几百米厚的碳酸盐岩, 整体处于被动陆缘沉积的构造背景, 这促进了该板块中储层和盖层的发育。波罗的板块纬度相对偏高, 主要为砂岩和页岩沉积。

关键词 寒武纪; 古板块; 板块构造; 岩相古地理; 古地理环境; 烃源岩

中图分类号: P542.4; TE121.3

文献标识码: A

寒武纪 (541.0~485.4 Ma)^[1-2]不仅是罗迪尼亚 (Roidinia) 超大陆裂解结束、冈瓦纳 (Gondwana) 超大陆形成的时期, 而且是埃迪卡拉 (Ediacaran) 软躯体生物向带硬骨骼生物转变并且迅速发展、分异和辐射的重要阶段。此时, 因新元古代冰期结束, 全球从“冰期”进入了温暖期, 海平面普遍上升, 中—晚寒武世全球普遍沉积碳酸盐岩, 全球多个地区如塔里木、澳大利亚、西伯利亚等已在寒武系发现了油气。因此, 寒武纪原型盆地的恢复及其岩相古地理的深入研究对于全球早期演化研究和能源勘探均具有重要意义。

前人对寒武纪全球古板块再造和岩相古地理开展了大量研究^[3-15], 并且形成了不同系列的全球古板块再造、全球古气候、岩相古地理等图件, 但这些图件多单一地去探讨关于古板块、古生物分布或岩相古地理等问题, 而并未对不同圈层、不同事件加以综合考虑, 因而缺乏在全球尺度上对寒武纪烃源岩的分布及构造背景、古环境等相互之间关系的讨论。

本文在板块构造、地幔柱、盆地分析等理论的指

导下, 依据最新的全球古地磁数据和区域地质资料等, 对寒武纪全球古板块位置进行恢复, 并结合前人资料绘制寒武纪 (~520 Ma) 全球古板块再造图, 以此探讨板块构造格局。然后对全球寒武纪沉积盆地地层进行分析, 同时借助于油气地质数据库和资料, 对早—中寒武世 (530~510 Ma) 全球岩相古地理进行再造, 并结合烃源岩数据及古生物证据, 试图从不同圈层来探讨寒武纪的全球演化问题及其相互之间的联系。

1 寒武纪板块构造格局

基于全球古地磁数据库 (GPMDB 4.6)^[16], 结合2004年之后的全球寒武纪古地磁数据, 依据V90标准^[17]对品质因子 $Q \geq 3$ 的古地磁数据进行筛选处理, 采用“球面样条法”^[18-19], 选择 Q 值为加权值, 以300为样条的参数, 对各个板块的视极移曲线进行拟合, 选取摩尔维德投影方式, 利用Gplate和GMAP等软件对寒武纪古板块位置进行恢复^[20-21], 同时结合前人成果图件^[3-15]对古板块位置进行校对和修正, 并对古地

收稿日期: 2013-07-17; 改回日期: 2014-03-11

本文受国家重点基础研究发展计划“973”项目“中国西部古亚洲洋构造域火山岩油气藏形成的地质背景” (编号: 2009CB219302) 资助

周肖贝: 女, 1989年生。现为北京大学地球与空间科学学院在读博士, 构造地质学专业。通讯地址: 100871 北京市海淀区北京大学; E-mail: xiaobeiyixin@gmail.com

磁数据较少的陆块(如塔里木陆块等)辅以地质资料的制约。通过结合前人关于大地构造、古地理和古生物等研究工作,选取 520 Ma 为时间节点,对全球寒武纪板块构造格局进行再造(图 1)。

罗迪尼亚超大陆于新元古代开始裂解,到寒武纪时板块已较分散。寒武纪全球主要板块包括冈瓦纳超大陆、劳伦古陆、波罗的板块和西伯利亚板块等。冈瓦纳超大陆由众多板块汇聚而成,包括非洲板块(西北非、东北非和南非)、南美洲(包括亚马逊、巴拉那和科罗拉多)、阿拉伯板块、东南极板块、印度板

块、马达加斯加板块、澳大利亚板块、塔里木陆块、拉萨地体和羌塘地体等,其边缘分布有阿瓦隆尼亚等小地体。劳伦古陆主要包括北美洲板块和格陵兰板块,其大部分地区寒武纪位于温暖的南半球热带和温带区域。西伯利亚为一独立的板块,位于劳伦古陆以东。波罗的板块位于西伯利亚以南,即现今的斯堪的纳维亚、东欧和欧陆俄罗斯。中国和东亚在当时均为众多小陆块,主要位于澳大利亚西部和北部。西欧也呈多个小陆块,大多位于现今北非海岸线的西北。此时的南极点位于西北非板块之上(图 1)。

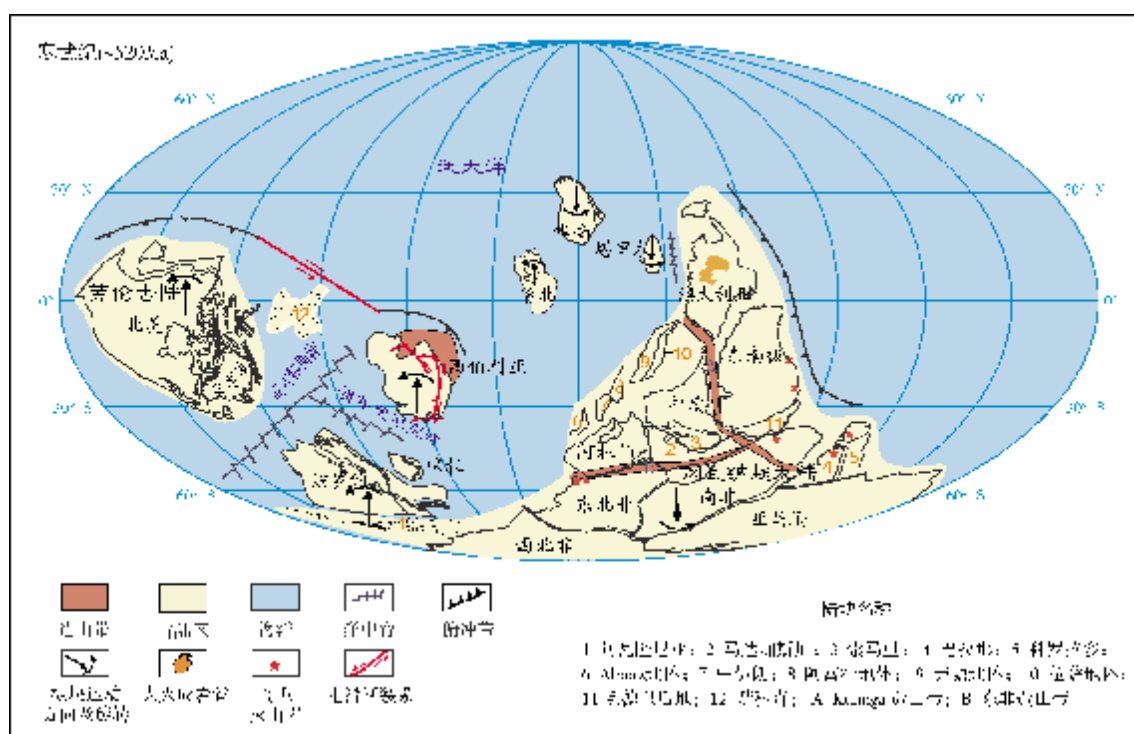


图 1 寒武纪全球古板块分布图[3-15, 22-29]

寒武纪的全球板块主要集中于南半球,北部为泛大洋。早—中寒武世,冈瓦纳超大陆快速向南漂移,波罗的、劳伦和西伯利亚逐渐向北漂移,众多板块均进行逆时针旋转,冈瓦纳超大陆漂移和旋转速率远远高于其他板块,劳伦和西伯利亚板块速率较低^[6]。晚寒武世冈瓦纳超大陆开始缓慢向北漂移,并于奥陶纪开始顺时针旋转,而波罗的在此期间经历了短暂的向南漂移过程。劳伦和波罗的板块在寒武纪期间持续低速向北漂移和旋转,华北、华南等陆块在此期间也缓慢向北漂移^[6]。劳伦古陆和波罗的板块之间为亚皮特斯洋,于 600~580 Ma 开始张开^[28],其宽度可达 3 000 km。普雷奥尼克洋张开于西伯利

亚和波罗的之间^[14-15]。冈瓦纳超大陆西缘的阿瓦隆尼亚地体,包括北美东部、纽芬兰、爱尔兰东南、英国、威尔士、比利时、荷兰和德国西北部,逐渐从冈瓦纳超大陆中裂离出来,并向波罗的斜向俯冲,与波罗的之间为通奎斯特洋^[29-31],其与冈瓦纳超大陆间发生裂谷作用,早奥陶世形成里菲洋^[32]。

西非东部边缘与亚马逊克拉通、刚果—圣弗朗西斯科克拉通,因巴西利亚(Brasiliano)造山运动而于震旦纪聚集到一起^[33],构成了冈瓦纳超大陆西部造山带。540~530 Ma 时莫桑比克洋盆最终闭合,形成东非造山带^[23](图1),即冈瓦纳中部造山带^[22]。而后,沿着平贾拉(Pinjarra)造山带,印度与澳大利

亚—东南极洲最终对接,形成Kununga造山带^[24](图1),即冈瓦纳东部造山带^[22]。西伯利亚附近于新元古代开始存在走滑断裂体系并一直持续到古生代^[28]。新元古代晚期到中生代,西伯利亚与海洋之间的作用是相对较独立的,没有其他较大板块的参与。西伯利亚板块在早—中寒武世存在岛弧岩浆作用^[27],晚寒武世漂移到北半球,古生代晚期到达北半球高纬地区。澳大利亚Delamerian造山运动始于新元古代晚期,在古生代寒武纪一直持续,使得岛弧增生到冈瓦纳大陆边缘。澳大利亚中部乌卢鲁(Uluru)存在时间长达510 Ma左右的大火成岩省,其下可能存在热点,延伸范围约400 000 km²^[7],澳大利亚北部和中部的部分地区在寒武纪早期被溢流玄武岩覆盖,在中寒武世还有一些残存。塔斯马尼亚(Tasmania)地区有中寒武世蛇绿岩仰冲记录,表明该时期冈瓦纳大陆边缘存在岛弧的增生。

2 寒武纪古地理和岩相分布

寒武纪处于新元古代冰期和古生代晚奥陶世冰期之间,随着新元古代冰川的消融,寒武纪全球海平面不断升高,并在寒武期末和奥陶纪初达到最高^[34],板块大部分被浅海覆盖(图2),全球主要为陆

表海环境。寒武纪全球气候较温和,中寒武世温度相对较高^[35]。全球气候带呈现出低梯度带的特征,干旱带分布范围较广^[36],这与此时温度的升高等环境变化呈现一定的关联性。

寒武纪的古地理格局与现今大为不同,对其重建主要综合了地质和生物证据。冰期时代,全球温度降低使得生物大量消亡,震旦纪生物主要为多细胞后生动物及小壳动物等简单生物,寒武纪时期地球上首次出现了带硬壳的动物。很多已知的寒武纪生物可在布尔吉斯页岩中发现,寒武纪生物以海生无脊椎动物为主,特别是三叶虫、低等腕足类和古杯动物,红藻、绿藻等开始繁盛。古杯动物作为底栖海洋生物出现于寒武纪生命大爆发早期,演化较快,地层中延续时间短^[37],主要出现在早寒武世,于中—晚寒武世逐渐消失。古杯动物一般生存于低纬度地区,诸如西伯利亚、北美、澳大利亚和东南极等地区(图2),它的存在可用于对寒武纪早期古地理环境进行界定。北美、华南、波罗的和澳大利亚等均有布尔吉斯页岩型生物群的分布^[38-40],华南澄江动物群和凯里生物群是当时海洋与海洋生物多样性及生态复杂化过程的见证及窗口^[41],它们共同反映了早期后生生物进化的过程,导致包括脊椎动物在内的现生动物各门类的诞生^[42]。

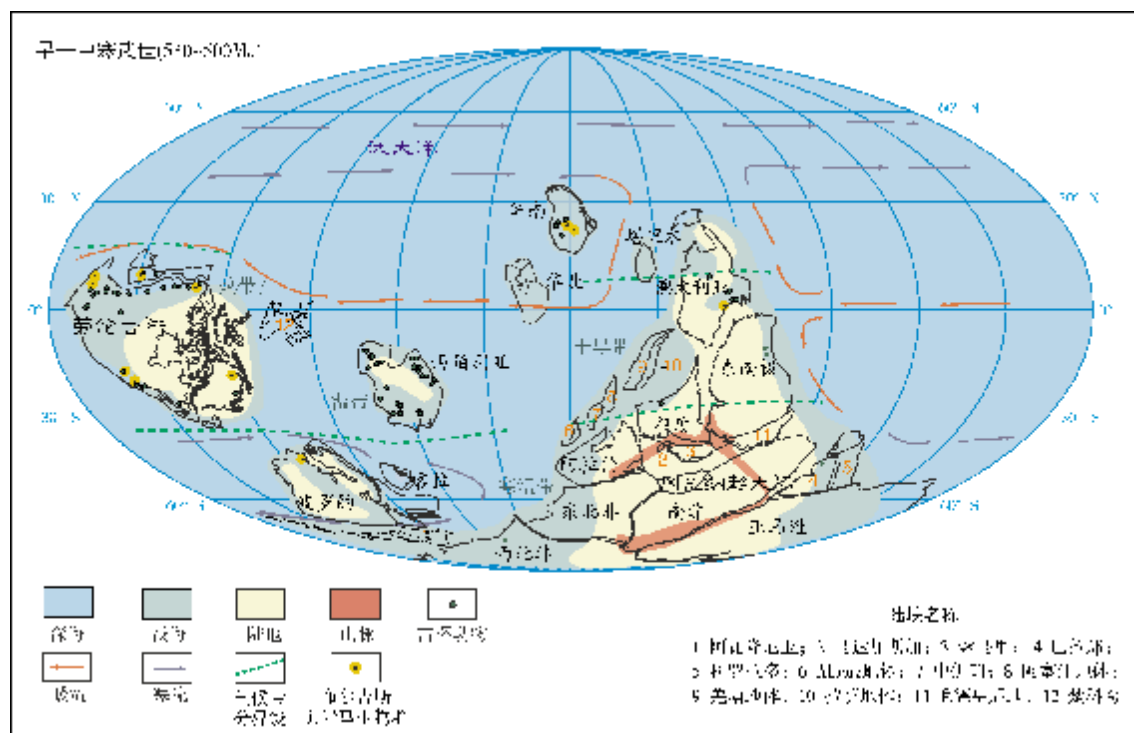


图2 早—中寒武世全球古地理图^[4, 36, 38-40, 43]

劳伦古陆 寒武纪位于赤道附近温暖区域,其沉积具有环带特征,由内向外分别为北美地盾、河流相—浅海相砂岩沉积、浅海相碳酸盐岩沉积、深海相泥页岩沉积(图3)。内外侧由于盐度和温度的差异,生物也有所差别,通常外缘化石较丰富,分异程度更高。北美北部和格陵兰东部地区除沉积碳酸盐岩外还有碳酸盐岩与碎屑岩的混合沉积^[44]。

西伯利亚 寒武纪为低纬地区单独的一板块,位于劳伦古陆和冈瓦纳超大陆之间,陆表海碳酸盐台地快速发展,由边缘趋于中心,碳酸盐岩沉积转变为蒸发岩(图3),并且偏中心地区火山活动相对较强,多具有火山岩夹层。

冈瓦纳超大陆 寒武纪超大陆边缘多被海水淹没,内部多为高地,中北部及两侧多以碳酸盐岩沉积为主,南部多以砂岩沉积为主(图3)。冈瓦纳超大陆的生物群最大,东南极和澳大利亚位于低纬度区,碳酸盐岩沉积较多。

澳大利亚 北部的Arafura-Money Shoal盆地寒武纪主要为浅海相碳酸盐岩沉积,但中部的Georgina盆地,寒武纪早期盆地北部为浅海相砾岩沉积,伴有火山活动,中寒武世普遍为浅海相环境,以碳酸盐岩沉积为主,夹杂砂岩和泥页岩沉积,部分地区烃源岩较有潜力,尤其是在盆地南部。南部的Amadeus盆地

由寒武纪早期的冲积扇—三角洲砂砾岩沉积逐渐过渡到浅海相砂岩和碳酸盐岩沉积,处于伸展阶段^[54]。

非洲 寒武纪非洲南部的沉积相对而言保留并不齐全。西北非靠近边缘处多为浅海相砂岩沉积,并夹杂一些碳酸盐岩和页岩,陆地内部多为河流—三角洲相砂砾岩沉积,整体为克拉通沉降环境。东北非早寒武世以陆相砂岩沉积为主,部分地区存在火山活动,但中—晚寒武世多转变为海相砂岩沉积,尤其是西部边缘。南非一般为河流相沉积,但也可见到浅海相碳酸盐岩的沉积,推断当时海平面不断上升。而位于高纬度的北非边缘有一些小块体,其古地理关系尚不清楚,这些小块体主要为现今的欧洲南部和北美洲东部的一部分,寒武纪主要为砂岩和页岩沉积,碳酸盐岩沉积很少或没有。

阿拉伯 西阿拉伯在寒武纪主要为陆相砂岩沉积,也夹杂海相碳酸盐岩沉积;扎格罗斯则以浅海相砂岩到局限台地白云岩沉积为主。阿曼盆地寒武纪早期为冲积扇砂岩沉积,晚寒武世北部为海相碳酸盐岩和泥页岩沉积,南部为陆相砂岩沉积^[51,54]。

波罗的 与其他板块相比沉积特征较明显,寒武纪沉积主体为砂岩和页岩沉积,河流相、浅海相兼具,这可能与纬度相对偏高有一定的联系。台地边缘多为浅海—深海相砂岩沉积并含有钙质泥岩,东部(现

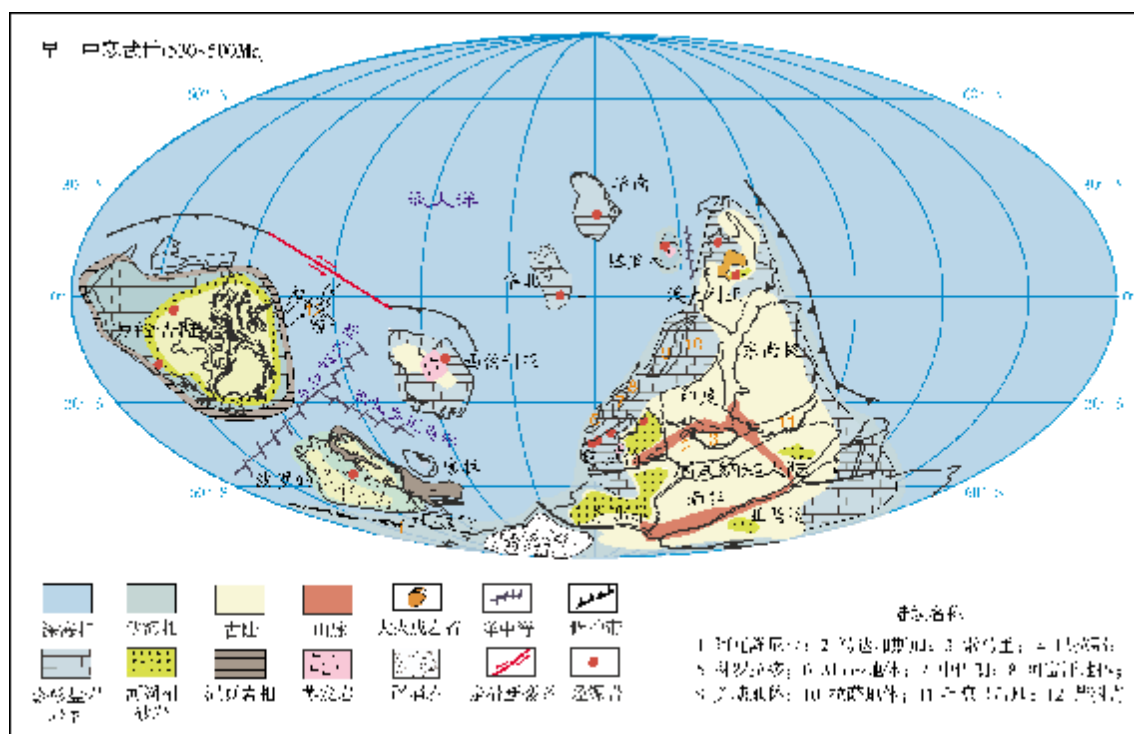


图3 寒武纪全球岩相古地理图及烃源岩分布图^[45-54]

今方位)多为陆相砂岩,向西部沉积环境逐渐过渡。

中国 众多小陆块寒武纪几乎全被海水淹没,故以海相碳酸盐岩台地沉积为主,下寒武统以富含有机质的页岩、硅质岩等为主(比如在塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和南黄海盆地等),部分地区发育品位较高的磷矿层(如华南西部的昆阳磷矿等)。中寒武世塔里木全盆普遍沉积蒸发岩,表明其局部海平面有所下降,形成蒸发台地。

3 寒武纪烃源岩分布

寒武纪烃源岩在当时的四大板块(包括冈瓦纳超大陆、劳伦古陆、西伯利亚板块和波罗的板块)以及中国陆块(包括华北、华南和塔里木陆块)中均有分布^[50-53](图3)。冈瓦纳超大陆上的烃源岩主要分布在澳大利亚和阿拉伯,这些烃源岩的形成多与被动陆缘、裂谷和克拉通内拗陷等构造背景下的海相环境有关^[55],主要为下寒武统富有机质黑色页岩和碳酸盐岩,多处于成熟—过成熟的状态,干酪根以Ⅰ型和Ⅱ型为主^[56-59],部分地区如波斯湾、塔里木和西伯利亚等发育中寒武统膏盐层,有利于油气的保存和封盖,从而烃源岩可与上覆碳酸盐岩储层和蒸发岩盖层构成较好的生储盖组合。目前西伯利亚、波罗的、阿拉伯、东北非、澳大利亚、塔里木和华南(四川盆地等)均已发现油气的发现。

然而,寒武纪作为生命大爆发初期,由于生物种类的限制,烃源岩生烃母质也比较单一,主要为低等水生生物(藻类及浮游生物)。早寒武世大气圈具有高CO₂含量与低O₂含量的特征^[60],古气候以干热为主。加拿大、西伯利亚、波罗的、华南、塔里木和澳大利亚等板块的寒武系底部沉积物中均发现有含磷层,部分磷矿品位较高,说明一般主要分布在温带—热带地区的暖流区域。热带干燥区的赤道洋流辐散带,形成低温、富含营养盐的上升洋流,极有利于广阔范围内烃源岩发育。磷块岩成因主要取决于洋流上升带来的深水团中磷质化学沉淀所形成的胶磷矿含量,这些富有机质地层的沉积与海水热液相关,通过上升涌流将有机质带到浅海或者陆棚而沉积。磷块岩同时富含小壳动物化石,但其形成与生物体本身所提供的磷关系不密切^[61]。

4 结 论

(1)寒武纪全球板块主要以冈瓦纳超大陆、劳伦古陆、西伯利亚板块和波罗的板块为主,它们多位于

南半球,其中除冈瓦纳超大陆主要向南漂移外,其他板块主要向北漂移,且均为逆时针旋转。冈瓦纳超大陆西缘小地体逐渐裂离冈瓦纳超大陆,其内部的泛非期造山运动接近于尾声,在澳大利亚和东南极等地可见到规模相对较大的岩浆事件,冈瓦纳东缘多为岛弧环境火山岩。

(2)伴随着新元古代冰期结束,寒武纪整体处于海平面上升的时期,海侵范围增大,同时全球温度回升,寒武纪作为显生宙的开始,出现了生命的“大爆发”,小壳动物化石大量出现,代表了寒武纪早期生物矿化质及量的变化或骨骼动物爆发性辐射,多赋存于早期的页岩沉积中。三叶虫演化速度较快,可在全球范围形成对比,古杯类多见于早—中寒武世,晚寒武世趋于灭绝。寒武纪气候带梯度不高,干旱气候带广泛分布,下—中寒武统多蒸发盐岩。

(3)寒武纪,由于温度及海平面的上升,全球多为陆表海环境,碳酸盐岩沉积占主要地位。劳伦古陆具环带沉积特征,碳酸盐岩普遍发育于环带外侧。冈瓦纳超大陆则多集中于北部。西伯利亚板块早—中寒武世主要以巨厚的膏盐岩沉积为主,晚期仅为几百米厚的碳酸盐岩沉积,其整体处于被动陆缘沉积的构造背景,这促进了该板块中储层和盖层的发育。波罗的板块所处纬度偏高,主体为砂岩、页岩沉积。冈瓦纳超大陆南部亦如此,主要为砂岩沉积,东部边缘多火山活动,在中部的西侧边缘地区碳酸盐岩沉积和砂岩沉积物中一般有更好的油气和烃源岩。寒武纪烃源岩主要为下寒武统富有机质地层的黑色页岩沉积,中寒武统多具有大套膏盐层的分布,可以构成良好的生储盖组合,有利于油气的保存。

参 考 文 献

- [1] PENG Shanchi, BABCOCK L E, COOPER R A. The Cambrian Period[M]// GRADSTEIN F M, OGG J G, SCHMITZ M D, et al. The geologic time scale. Boston: Elsevier, 2012: 437-488.
- [2] COHEN K M, FINNEY S, GIBBARD P L. The ICS international chronostratigraphic chart[J]. Episodes, 2013, 36(3): 199-204.
- [3] GOLONKA J. Cambrian-Neogene plate tectonic maps[M]. Wydawn Uniwersytetu Jagiellońskiego, 2000.
- [4] SCOTese C R. Plate tectonic maps and continental drift animations[J/OL]. PALEOMAP Project, 2006, <http://www.scotese.com>.
- [5] GOLONKA J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeotethofacies maps of the Arctic region[C]// Memoirs of the Geological Society, London, 2011, 35(1): 79-129.
- [6] TORSVIK T H, VAN DER VOO R, PREEDEN U, et al. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 114(3/4): 325-368.
- [7] VEEVERS J J. Gondwanaland from 650-500Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185-100Ma breakup: Su-

- percontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating [J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 68(1/2): 1-132.
- [8] 黄宝春, 周桃秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 348-359.
- [9] BLAKEY R C. Gondwana paleogeography from assembly to breakup—A 500 m. y. odyssey[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2008, 441: 1-28.
- [10] COCKS L R M, TORSVIK T H. Siberia, the wandering northern terrane, and its changing geography through the Palaeozoic [J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 82(1): 29-74.
- [11] FORD D, GOLONKA J. Phanerozoic paleogeography, paleoenvironment and lithofacies maps of the circum-Atlantic margins [J]. *Marine and petroleum geology*, 2003, 20(3): 249-285.
- [12] VAN STAAL C R, DEWEY J F, MAC NIOCAILL C, et al. The Cambrian-Silurian tectonic evolution of the northern Appalachians and British Caledonides: History of a complex, west and southwest Pacific-type segment of Iapetus[J]. *The Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 143(1): 197-242.
- [13] LI Zhengxiang, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 179-210.
- [14] GOLONKA J, ROSS M I, SCOTSE C R. Phanerozoic paleogeographic and paleoclimatic modeling maps [C]// EMBRY A F, BEAUCHAMP B, GLASS D J. *Pangea: Global environment and resources*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1994, 17: 1-47.
- [15] SCOTSE C R, MCKERROW W S. Revised world maps and introduction [C]// MCKERROW W S, SCOTSE C R. *Paleozoic paleogeography and biogeography*. Geological Society Memoir, 1990, 12: 1-21.
- [16] PISAREVSKY S. New edition of the global paleomagnetic database [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2005, 86(17): 170.
- [17] VANDER V R. The reliability of paleomagnetic data [J]. *Tectonophysics*, 1990, 184(1): 1-9.
- [18] BUSS S R, FILLMORE J P. Spherical averages and applications to spherical splines and interpolation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2001, 20(2): 95-126.
- [19] JUPP P E, KENT J T. Fitting smooth paths to spherical data [J]. *Applied Statistics*, 1987, 36(1): 34-46.
- [20] WILLIAMS S E, MÜLLER R D, LANDGREBE T C W, et al. An open-source software environment for visualizing and refining plate tectonic reconstructions using high-resolution geological and geophysical data sets [J]. *GSA Today*, 2012, 22(4): 4-9.
- [21] TORSVIK T H, SMETHURST M A. Plate tectonic modelling: Virtual reality with GMAP [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25(4): 395-402.
- [22] SANTOSH M, MARUYAMA S, SAWAKID Y, et al. The Cambrian Explosion: Plume-driven birth of the second ecosystem on earth [J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(3): 945-965.
- [23] MEINHOLD G, MORTON A C, AVIGAD D. New insights into peri-Gondwana paleogeography and the Gondwana super-fan system from detrital zircon U-Pb ages [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23 (2): 661-665.
- [24] CORDANI U G, TEIXEIRA W, D'AGRELLA-FILHO M S, et al. The position of the Amazonian Craton in supercontinents [J]. *Gondwana Research*, 2009, 15(3): 396-407.
- [25] AVIGAD D, GVIRTZMAN Z. Late Neoproterozoic rise and fall of the northern Arabian-Nubian shield: The role of lithospheric mantle delamination and subsequent thermal subsidence [J]. *Tectonophysics*, 2009, 477(3): 217-228.
- [26] COCKS L R M, FORTEY R A. Avalonia: A long-lived terrane in the Lower Palaeozoic? [J]. *The Geological Society, London, Special Publications*, 2009, 325(1): 141-155.
- [27] KHAJIA E V, BIBIKOVAB E V, SALNIKOVA E B, et al. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: New geochronologic data and palaeotectonic reconstructions [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/4): 329-358.
- [28] METELKIN D V, VERNIKOVSKY V A, KAZANSKY A Y. Tectonic evolution of the Siberian paleocontinent from the Neoproterozoic to the Late Mesozoic: paleomagnetic record and reconstructions [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, 53(7): 675-688.
- [29] TORSVIK T H, SMETHURST M A, MEERT J G, et al. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic: A tale of Baltica and Laurentia [J]. *Earth-Science Reviews*, 1996, 40(3): 229-258.
- [30] MCKERROW W S, DEWEY J F, SCOTSE C R. The Ordovician and Silurian development of the Iapetus Ocean [C]// BASSETT M G, LANE P D, EDWARDS D. *The Murchison Symposium. Proceedings of An International Conference on the Silurian System*. Special Papers Palaeontology, 1991, 44: 165-178.
- [31] DALZIEL I W D. Overview: Neoproterozoic-Paleozoic geography and tectonics: Review, hypothesis, environmental speculation [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, 109 (1): 16-42.
- [32] VON RAUMER J F, STAMPFLI G M. The birth of the Rheic Ocean—Early Palaeozoic subsidence patterns and subsequent tectonic plate scenarios. *Tectonophysics*, 2008, 461(1/4): 9-20.
- [33] TROMPETTE R. Neoproterozoic (600 Ma) aggregation of Western Gondwana: A tentative scenario [J]. *Precambrian Research*, 1997, 82(1/2): 101-112.
- [34] VAIL P R, MITCHUM R M, THOMPSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level, Part 4: Global cycles of relative changes of sea-level [J]. *AAPG Memoir*, 1977, 26: 83-97.
- [35] SHI G R, WATERHOUSE J B. Late Palaeozoic global changes affecting high-latitude environments and biotas: An introduction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 298(1/2): 1-16.
- [36] BOUCOT A J, 陈旭, SCOTSE C R, 等. 显生宙全球古气候重建 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [37] 杨爱华, 袁克兴. 古杯动物化石的研究现状 [J]. *古生物学报*, 2012, 51(2): 222-237.
- [38] HENDRICKS J R, LIEBERMAN B S, STIGALL A L. Using GIS to study palaeobiogeographic and macroevolutionary patterns in soft-bodied Cambrian arthropods [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 264(1/2): 163-175.
- [39] MEERT J G, LIEBERMAN B S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran-Cambrian radiation [J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(1): 5-21.
- [40] ÁLVAROA J J, FERRETTI A, GONZÁLEZ-GÁMEZ C, et al. A review of the Late Cambrian (Furongian) palaeogeography in the western Mediterranean region, NW Gondwana [J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 85(1): 47-81.

- [41] ZHAO Yuanlong, ZHU Maoyan, BABACOCK L E, et al. Kaili Biota: Ataphonomic window on diversification of Metazoans from the basal Middle Cambrian: Guizhou, China [J]. *Acta Geological Sinica*, 2005, 79(6): 751-765.
- [42] HOU Xianguang, BERGSTRÖM J. The Chengjiang fauna—the oldest preserved animal community [J]. *Palaeontological Research*, 2003, 71(1): 55-57.
- [43] Paleobiology Database [DB/OL]. <http://fossilworks.org>.
- [44] TRETTIN H P, BALKWILL H R. Contributions to the tectonic history of Innuition Province Arctic Canada [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1979, 16(3): 748-769.
- [45] BOGER S D. Antarctica -Before and after Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(2): 335-371.
- [46] COCKS L M R, TORSVIK T H. The Palaeozoic geography of Laurentia and western Laurussia: A stable craton with mobile margins [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 106(1): 1-51.
- [47] COCKS L M R, TORSVIK T H. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 117: 40-79.
- [48] DILL H G, PÖLLMANN H, TECHMER A. 500 Million years of rift-and unconformity-related Mn mineralization in the Middle East: A geodynamic and sequence stratigraphical approach to the recycling of Mn [J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 53: 112-133.
- [49] GOLONKA J, GAHAGAN L, KROBICKI M, et al. Plate-tectonic evolution and paleogeography of the circum-Carpathian region [C]//GOLONKA J, PICHA F J. The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources, AAPG Memoir, 2006, 84: 11-46.
- [50] BERTRAND R, LAVOIE D, FOWLER M. Cambrian-Ordovician shales in the Humber zone: Thermal maturation and source rock potential [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2003, 51(3): 213-233.
- [51] LI Maowen, JIANG Chunqing, HUANG Yongsong. Use of compound specific hydrogen isotopes characterizing crude oils from the Canadian Williston Basin, SE Saskatchewan [C] // Annual Meeting of the American Association of Petroleum Geologists, Houston. Expanded Abstracts, 2002: 103.
- [52] TERKEN J M J, FREWIN N L, INDRELID S L. Petroleum systems of Oman: Charge timing and risks [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(10): 1817-1845.
- [53] VERFELT J P L. Major Hydrocarbon Potential in Iran [J]. *AAPG Memoir*, 2001, 74: 417-427.
- [54] 李江海, 杨静懿, 马丽亚, 等. 显生宙烃源岩分布的古板块再造研究 [J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1683-1698.
- [55] LONGLEY I M, BRADSHAW M T, HEBBERGER J. Australian petroleum provinces of the twenty-first century [J]. *AAPG Memoir*, 2001, 74: 287-317.
- [56] WANG Feiyu, ZHANG Baomin, ZHANG Shuichang. Anoxia vs. bioproductivity controls on the Cambrian and Ordovician marine source rocks in Tarim Basin, China [C]// Annual Meeting of the American Association of Petroleum Geologists, Houston. Expanded Abstracts, 2002: 185.
- [57] 戴金星, 刘德良, 曹高社. 华北陆块南部下寒武统海相泥质烃源岩的发现对天然气勘探的意义 [J]. *地质论评*, 2003, 49(3): 322-329.
- [58] 梁薇, 牟传龙, 周慧慧, 等. 湘中地区下寒武统烃源岩沉积环境及其特征 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2011, 31(4): 34-39.
- [59] 于炳松, 樊太亮. 塔里木盆地寒武系—奥陶系泥质烃源岩构造和沉积背景控制 [J]. *现代地质*, 2008, 22(4): 534-540.
- [60] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 39-48.
- [61] 高慧. 贵州西部早寒武世早期小壳动物和古环境研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2005.

编辑: 赵国宪

Reconstruction of Cambrian Global Paleo-plates and Paleogeography

Zhou Xiaobei, Li Jianghai, Wang Honghao, Li Wenshan

Abstract: The global maps of Cambrian plate tectonics, paleogeography, lithofacies and source rock distribution are compiled up for reconstructing Cambrian global paleo-plates on the basis of the paleomagnetic data and the updating data of the Cambrian global tectonics, lithofacies paleogeography and source rocks. Cambrian plates can be divided into four parts including Gondwana, Laurentia, Siberia and Baltica. They were generally distributed in the southern hemisphere and drifted northwards with contrarotating rotation except the southwards drifting Gondwana supercontinent. Owing to rising of global sea level eustasy and temperature for a long time during the whole Cambrian, the global plates were generally in epeiric sea environments which promoted the Early Cambrian organic-rich deposits and dominant carbonate deposits and provided good conditions for Cambrian life explosion, which were characterized by low climate zone gradients and widely-distributing drought climate zones that led to Lower and Middle Cambrian evaporate and salt deposits. In Gondwana supercontinent, carbonate deposits were mainly in the north part, sandstone deposits in the south and volcanic activities mainly in the east while good source rocks and petroleum resources were commonly distributed in the carbonate and sandstone deposits along the west margin of the central part. Laurentia was characteristic of band sedimentation, outer of which carbonate deposits existed. Huge evaporate rock deposited in the Siberia plate during the Middle-Lower Cambrian and only a few hundreds meter thickness of carbonate deposits did in the late Cambrian, which improved the development of reservoirs and seals under the setting of passive margin. Sandstone and shale were commonly deposited in Baltica plate at relatively high latitude.

Key words: Cambrian; Paleo-plate; Plate tectonics; Lithofacies paleogeography; Paleoenvironment; Source rock

Zhou Xiaobei, female, DSc degree in progress at School of Earth and Space Sciences, Peking University. Add: 5 Yiheyuan Rd., Beijing, 100871, China