论文

塔里木盆地寒武系芙蓉统SPICE的发现与碳同位素地层学对比

陈永权^{1*}, 张艳秋¹, 吴亚生^{2,3,4}, 周鹏¹, 李开开^{5,6}, 王晓雪¹

1. 中国石油塔里木油田分公司, 库尔勒 841000;
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 中国地质大学能源学院, 北京 100083;
6. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: chenyongquan-tlm@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019-10-08; 收修改稿日期: 2020-04-10; 接受日期: 2020-04-27; 网络版发表日期: 2020-06-17

国家科技重大专项项目(编号: 2016ZX05004-004、2017ZX05008-005)资助

摘要 塔里木盆地寒武系芙蓉统发育大量的结晶白云岩, 是油气勘探的重要目标层系。由于生物化石较少, 且前人未在碳同位素地层研究中发现SPICE漂移这一芙蓉统标志, 芙蓉统等时对比格架一直未能建立。本研究通过对塔里木盆地覆盖区的塔西台地和塔东盆地的代表性钻井的碳同位素地层研究, 在塔里木盆地发现SPICE漂移, 在塔西台地区三个钻井的下丘里塔格组中部均出现碳同位素正异常, 幅度达1.5~1.9‰; 在塔东盆地区突尔沙克塔格群下灰岩段出现幅度高达4.0‰的正漂移; 据之大致确定了寒武系芙蓉统的底界。发现塔西台地区三个钻孔蓬莱坝组底部、塔东盆地区塔东2井突尔沙克塔格群顶部都出现一个 $\delta^{13}\text{C}$ 值微弱正异常。提出碳同位素微弱负漂移之后的正漂移作为确定塔里木盆地奥陶系/寒武系界线的同位素地层标志, 初步建立了塔里木盆地芙蓉统跨隆起、跨相区的等时对比格架。

关键词 塔里木盆地, 寒武系, 芙蓉统, SPICE, 碳同位素地层学

1 引言

塔里木盆地寒武系下丘里塔格组发育巨厚结晶白云岩, 经风化淋滤作用可形成优质的裂缝-孔洞型白云岩储层。目前已在多个区块发现下丘里塔格组白云岩潜山油气藏, 例如英买32、中古58等(谢会文等, 2017)。随着塔中-塔北富油气区深层中古113、中古70

等井的发现, 下丘里塔格组内幕型结晶白云岩有很大的勘探潜力。由于大量白云石化导致缺少生物化石, 并且前人碳同位素地层学研究未发现SPICE(Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion)——芙蓉统典型标志(朱茂炎等, 2019), 芙蓉统等时对比格架尚未建立起来。近20年来, 碳同位素地层学方法已在年代地层对比中得到大量应用, 已被证实可作为全球性等时对比的

中文引用格式: 陈永权, 张艳秋, 吴亚生, 周鹏, 李开开, 王晓雪. 2020. 塔里木盆地寒武系芙蓉统SPICE的发现与碳同位素地层学对比. 中国科学: 地球科学, 50: 1259–1267, doi: [10.1360/SSTe-2019-0236](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0236)

英文引用格式: Chen Y, Zhang Y, Wu Y, Zhou P, Li K, Wang X. 2020. Discovery of SPICE and carbon isotope stratigraphic correlation of the Cambrian Furongian Series in Tarim Craton, NW China. Science China Earth Sciences, 63: 1330–1338, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9623-2>

重要依据。前人根据不同地区大量的实验数据已经建立起寒武系4统10阶的全球同位素地层标准(Zhu等, 2006; Peng和Babcock, 2008; 樊茹等, 2011; Peng等, 2012)。前人的研究在塔里木盆地未发现SPICE碳同位素漂移(朱茂炎等, 2019), 所以塔里木盆地的芙蓉统顶底界线尚不清楚。因此, 寒武系芙蓉统地层研究不仅具有油气勘探意义, 也具有科学意义。本研究旨在通过同位素地层学方法, 解决跨构造单元、跨相区的等时对比问题, 建立塔里木盆地钻孔寒武系芙蓉统等时对比格架。

2 地质背景与样品采集

2.1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北部, 新疆自治区南部, 被天山、昆仑山、阿尔金山围绕, 面积约56万平方公里。受台-坡-盆构造格架控制, 塔里木盆地芙蓉统呈现西台东盆的沉积格局; 轮南-古城斜坡、罗西斜坡将塔里木盆地分隔为塔西台地、塔东盆地与罗西台地三个沉积区(Chen等, 2013; 陈永权等, 2015)(图1)。塔里木盆地现今构造划分为“五隆五坳”10个一级构造单元, 分别是柯坪断隆、巴楚隆起、塔中隆起、东南隆起、塔北

隆起、西南坳陷、塘古坳陷、东南坳陷、北部坳陷与库车坳陷(图1)。由于寒武系埋深较大, 塔里木盆地内钻揭寒武系的钻孔主要分布在五大隆起之上。

塔西台地内芙蓉统岩石地层划分采用与柯坪地区露头相同的方案。1941~1943年, 苏联人西尼村在柯坪地区定义了大致属于芙蓉统到早奥陶世的丘里塔格群。周棣康等(1991)根据生物化石、岩性、地震地层学特征、同位素和微量元素特征, 将丘里塔格群划分为下丘里塔格群和上丘里塔格群; 下丘里塔格群以结晶白云岩为主, 上丘里塔格群以白云岩/灰岩互层或厚层灰岩为主; 并根据新疆地质研究所在阿瓦塔格组顶部采获的苗岭统三叶虫化石, 将下丘里塔格群划归芙蓉统。目前上丘里塔格群已被蓬莱坝组、鹰山组代替而不再使用, 下丘里塔格群更名为下丘里塔格组, 由巨厚结晶白云岩组成。

下丘里塔格组在西部台地分布广泛, 与下伏阿瓦塔格组整合接触, 与上覆下奥陶统蓬莱坝组呈平行不整合接触。柯坪地区肖尔布拉克剖面下丘里塔格组厚约320m; 覆盖区钻孔下丘里塔格组普遍较厚, 视厚度在600~1500m不等。野外露头与覆盖区钻孔下丘里塔格组均表现为上下两段特征(陈永权等, 2010; 赵宗举等, 2010), 下段以灰色中-薄层藻白云岩、隐藻白云岩

图1 塔里木盆地芙蓉统沉积格架与研究井位置图

夹亮晶砂屑云岩和泥晶白云岩为主, 发育水平及微波状层理, 储层发育条件差; 上段以浅灰-灰色中厚层细晶白云岩、砂屑白云岩为主, 夹泥晶白云岩藻纹层白云岩; 上下两端在GR电测曲线上无明显区分标志。

塔东盆地区岩石地层单位采用库鲁克塔格地区地层系统, 芙蓉统由突尔沙克塔格群构成, 岩性以灰岩、含泥灰岩、泥质灰岩为主, 厚度在200m左右。

本研究涉及舒探1井、中深1井、英探1井和塔东2井, 分别位于巴楚隆起、塔中隆起、塔北隆起和塔东隆起(图1); 前三口井代表了塔西台地地层体系, 塔东2井代表了塔东盆地地层体系。舒探1、中深1、英探1井下丘里塔格组以结晶白云岩为主, 上覆下奥陶统蓬莱坝组岩性以云灰互层为特征, 下伏地层苗岭统阿瓦塔格组以藻云岩、蒸发盐岩等为主。塔东2井突尔沙克塔格群以灰岩、含泥灰岩、泥质灰岩为主; 上覆黑土凹组为黑色碳质泥岩, 下伏莫合尔山组为泥质灰岩(图2)。

2.2 样品采集

前人研究认为塔西台地区寒武系顶处于蓬莱坝组

下部(景秀春等, 2008), 为了取全芙蓉统钻孔样品, 本研究针对舒探1、中深1、英探1三个塔西台地区钻孔下丘里塔格组-蓬莱坝组进行取样, 共取样320个(图2)。舒探1井取样段深度为550~1500m, 取样间隔为5~10m, 共计采集样品138个; 中深1井取样段井深为4990~6100m, 取样间隔为4~20m, 共取样121个; 英探1井取样井段为6560~7430m, 取样间隔为10~20m, 共计取61个。塔东盆地区塔东2井寒武系厚度较薄, 取样适度加密, 间隔2~5m, 取样井段为4570~4870m, 跨越莫合尔山组-突尔沙克塔格群, 总计取样93个。

3 分析方法与结果

3.1 分析方法

钻孔岩屑样品首先需要精挑, 以避免上覆地层掉块及钻井液结晶颗粒混染, 精挑后将样品研磨成粉末。全岩C-O同位素分析测试在核工业北京地质研究院国家重点实验室完成。分析方法采用传统磷酸法, 分析仪器采用Fannigan MAT Delta XP型连续流质谱仪。自动进样器装置中以100%磷酸与样品粉末在抽真空后,

图2 研究钻孔芙蓉统岩石地层柱状简图

50℃条件下反应2h, 生成的CO₂气体直接进同位素质谱仪进行碳氧同位素组成分析。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析数值采用V-PDB标准计算, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果绝对误差 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

3.2 分析结果

舒探1井下丘里塔格组-蓬莱坝组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -1.9‰ ~ 0.7‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化在 -10.4‰ ~ -4.6‰ ; 中深1井下丘里塔格组-蓬莱坝组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -3.3‰ ~ -0.1‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化在 -9.6‰ ~ -4.4‰ ; 英探1井下丘里塔格组-蓬莱坝组 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -2.1‰ ~ 0.1‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化在 -10.7‰ ~ -5.5‰ ; 塔东2井莫合尔山组-突尔沙克塔格群 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -2.7‰ ~ 3.8‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化在 -11.3‰ ~ -9.1‰ 。舒探1、中深1、英探1与塔东2四个钻孔岩屑全岩碳氧同位素相关性不明显, 数据点相对平滑不跳跃(图3~5), 表明本研究分析样品受成岩作用影响很小, 基本代表成岩作用前的同位素变化曲线(Kaufman等, 1993; Kaufman和Knoll, 1995)。

塔西台地区三个钻孔下丘里塔格组中部均出现碳同位素正异常P1; 塔东盆地区突尔沙克塔格群下灰岩段出现明显的碳同位素正异常(图4和5)。舒探1井1100~1250m段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -1.0‰ ~ 0.7‰ , 最高值比上下层高出 1.9‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征表现为两高夹一低的特点; 中深1井5550~5750m的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -1.5‰ ~ -0.1‰ , 与上下层相比, 正异常幅度约 1.6‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征表现为两高夹一低的特点; 英探1井6980~7200m的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -1.0‰ ~ 0.1‰ , 与上下层相比, 正异常幅度约 1.5‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征表现为两高夹一低的特点。塔东2井突尔沙克塔格群下灰岩段(4705~4785m) $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -0.4‰ ~ 3.8‰ , 与上下层相比, 正异常幅度高达 4.0‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征表现为正异常特点, 内部低 $\delta^{13}\text{C}$ 异常特征不明显。

四个钻孔均揭示在P1(P1')碳同位素正异常之上发育一低平 $\delta^{13}\text{C}$ 值段(N1, 图4和5)。舒探1井900~1050m井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -1.7‰ ~ -1‰ , 中深1井5330~5460m井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 -3.3‰ ~ -1.5‰ , 英探1井6840~6900m井段

图3 四个钻孔碳氧同位素分析数据交汇图

(a) 舒探1井; (b) 中深1井; (c) 英探1井; (d) 塔东2井

图4 舒探1井、中深1井碳氧同位素分析结果剖面图

左, 舒探1; 右, 中深1

$\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-1.8\sim-1.1\text{‰}$, 塔东2井4650~4700m井段
 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-0.2\sim-0.6\text{‰}$.

塔西台地区舒探1、中深1与英探1三个钻孔下丘里塔格组顶部-蓬莱坝组底部出现 $\delta^{13}\text{C}$ 值正异常特征, 表现出两高夹一低特点(P2、N2、P3); 蓬莱坝组上部出现一个明显的碳同位素正漂移P4(图4和5). 舒探1井790~850m井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-0.6\sim-0.4\text{‰}$, 表现出两高夹一低特点; 在618m左右出现一个明显的碳同位素正异常. 中深1井5140~5300m井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-1.9\sim-0.5\text{‰}$, 表现出正异常特点; 在蓬莱坝组上部5050m左右出现明显的碳同位素正异常. 英探1井6730~6840m井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $-2.0\sim-0.0\text{‰}$, 表现出两高夹一低特点; 在蓬莱坝组上部6650m处出现一个明显的碳同位素正异常. 塔东盆地塔东2井突尔沙克塔格群顶部出现 $\delta^{13}\text{C}$ 值正异常特征, 内部 $\delta^{13}\text{C}$ 为低值(P2'、N2'、P3')(图4和5), 4590~4650m井段 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化在 $1.0\sim2.0\text{‰}$, 表现出高正异常特点.

4 讨论

4.1 生物地层约束

塔里木盆地塔东地层分区寒武系顶部突尔沙克塔格群已经有三叶虫化石与牙形刺化石作为芙蓉统的可靠证据. 前人在塔东库鲁克塔格露头区莫合尔山组顶部发现代表苗岭统顶部的*Lejopyge laevigata*三叶虫化石, 在上覆突尔沙克塔格群底部发现了芙蓉统的标志化石三叶虫*Glyptagnostus reticulatus*(章森桂, 1982; 朱兆玲和林焕令, 1983; 高振家等, 1984; 成守德, 1985; 张太荣, 1990), 基本确定突尔沙克塔格群底为芙蓉统底. 王朴和朱国贤(1988)在塔里木盆地东部的新疆尉犁县却尔却克山剖面寒武系顶部突尔沙克塔格群顶部发现三叶虫化石*Lotagnostus hedini*和*L. asiaticus*等. 张太荣(1990)也报道新疆库鲁克塔格寒武系顶部突尔沙克塔格群产三叶虫化石*Lotagnostus hedini*和*L. asiaticus*. *Lotagnostus hedini*被认为是寒武系芙蓉统顶部的第二

图5 英探1井、塔东2井碳氧同位素分析结果剖面图

左, 英探1; 右, 塔东2

个化石带(朱涛等, 2013). 赵宗举等(2006)在突尔沙克塔格群顶部含灰泥岩段发现了*Cordylodus lindstromi*和*C. intermedius*两种牙形刺化石, 证实突尔沙克塔格群跨越寒武系-奥陶系界线, 但主体在寒武系中。

塔里木盆地西部台地区因大量的白云岩地层贫生物化石, 芙蓉统顶底界一直不清楚。一般认为, 芙蓉统由下丘里塔格组构成, 上覆蓬莱坝组属于奥陶系, 下伏阿瓦塔格组属于苗岭统。景秀春等(2008)在属于西部台地区的新疆乌什鹰山剖面的蓬莱坝组底部发现了牙形石*Teridontus nakamurai*, 在距该组底16.3m处发现牙形刺*Proconodontus cambricus*。在华南, *Proconodontus*是寒武纪最晚期的化石带, 其上即为寒武系最顶部的*Cordylodus proavus*带(董熙平, 1999)。 *Proconodontus*和*Cordylodus*是世界性分布的寒武纪最晚期牙形刺化石。在大阳岔剖面, *Teridontus nakamurai*与*Proconodontus*在相同的层位首现, 但一直延续到奥陶系底部(Wang等, 2019)。牙形刺*Teridontus nakamurai*和*Proconodontus*的出现, 说明蓬莱坝组底部大致是芙蓉统最

晚期的地层, 但芙蓉统底界无法通过生物地层方法确定。

4.2 SPICE碳同位素漂移与芙蓉统底界

自Saltzman等(1998)在美国内华达州发现Step-toean Positive Carbon Isotope Excursion(SPICE)以来, 该漂移已被证实西伯利亚(Kouchinsky等, 2008)、华南(Zhu等, 2004)、华北(Ng等, 2014)、瑞典(Ahlberg等, 2009)、英国(Woods等, 2011)、阿根廷(Sial等, 2008, 2013)等地区普遍存在。SPICE底界的同位素测年在500Ma左右, 可以作为确定寒武系芙蓉统排碧阶底界的重要依据。前人已经对塔西北肖尔布拉克露头区开展了碳同位素地层学研究, 但未在下丘里塔格组中发现明显的碳同位素正漂移(朱茂炎等, 2019)。

塔西台地区下丘里塔格组中部的碳同位素正漂移、塔东盆地区突尔沙克塔格群下部的碳同位素正漂移可以与全球性碳同位素漂移事件SPICE相对比。塔西台地区舒探1、中深1和英探1三个钻孔下丘里塔格

组中部都显示碳同位素正漂移, 塔东盆地区塔东2井突尔沙克塔格群中下部也显示一个明显的碳同位素正漂移. 这四个钻孔的碳同位素漂移具有相似点, 该漂移之上还显示一个不明显的正漂移. 塔东2井该碳同位素漂移出现在*G. reticulatus*化石带之上, 与北美、西伯利亚、华南、哈萨克斯坦等地的SPICE出现在大致相同的层位. 本研究四个钻孔的碳同位素漂移结构和之上有一个微弱漂移也与北美、西伯利亚、华南、哈萨克斯坦等地的SPICE漂移及Post-SPICE漂移有很好的可比性(图6).

4.3 碳同位素漂移与寒武系顶界面

前人报道的在SPICE之上同位素漂移记录有HERB(Ripperdan, 2002)、SNICE(Sial等, 2008)、TOECE(Zhu等, 2006)等, 这三个碳同位素异常可能代表同一次事件, 这个负异常事件位于牙形刺*Euconodontus*带, 与奥陶系底界接近(朱茂炎等, 2019). 国际地层委员会(ICS)(2000)表决通过将加拿大Newfoundland西海岸的Green Point剖面作为全球奥陶系/寒武系界线层型剖面, 奥陶系的底界为*Iapetognathus fluctivagus*带之底. 鉴于*Iapetognathus fluctivagus*在中国很少发现且易错误鉴定(Miller等, 2014; Wang等, 2019), 全国地层委员会(2001)将*Cordylodus lindstromi*带作为中国奥陶系最底部的生物带. 塔东盆地区, 周志毅和陈丕基(1990)在库鲁克塔格地区突尔沙克塔格群近顶部发现了*Cordylodus intermedius*带和*C. lindstromi*带, 因此将*Cordylodus lindstromi*的首现(FAD)作为塔里木盆地

奥陶系最底部的带. 本研究在碳同位素负异常HERB与邻近露头发现的*Cordylodus lindstromi*与*Variabiloconus* aff. *gassleri*化石带之间, 通过与澳大利亚Black Mountain剖面、美国Lawson Cove剖面和西伯利亚Kulyumbe剖面对比碳同位素变化确定奥陶系/寒武系界线.

在澳大利亚Black Mountain剖面与美国Lawson Cove剖面, 奥陶系/寒武系界线被置于牙形刺*C. lindstromi*出现后的碳同位素正异常峰值处, 向上碳同位素降低(Miller等, 2006). 在西伯利亚Kulyumbe剖面上, 没有找到*C. lindstromi*牙形刺, 奥陶系/寒武系界线定在牙形刺*C. angulatus*之下的碳同位素正异常峰值处, 向奥陶系碳同位素降低(Kouchinsky等, 2008).

塔东2钻孔距突尔沙克塔格群顶约26m处出现碳同位素微弱负漂移之后的正漂移, 向上碳同位素值稳定降低, 与古生物研究的结果一致, 本文建议将该正漂移作为奥陶系/寒武系界线. 该方案与澳大利亚Black Mountain剖面、美国Lawson Cove剖面和西伯利亚Kulyumbe剖面寒武系顶界的同位素依据相似.

塔西台地区, 赵治信等(2000)和赵宗举等(2006)将*V. aff. bassleri*的始现作为柯坪地区奥陶系的底界. 邓胜徽等(2007)¹⁾在柯坪水泥厂剖面第66层(蓬莱坝组底之上120m左右)发现了*V. aff. bassleri*牙形刺带, 因为无法判断是否首现, 奥陶系/寒武系界线置于该化石带之下. 景秀春等(2008)基于古生物依据与碳同位素地层学依据将蓬莱坝组底向上推43m, 将碳同位素正异常作为奥陶系底. 舒探1井蓬莱坝组底部为一套颗粒灰

图6 寒武系芙蓉统排碧阶同位素地层对比图

1) 邓胜徽, 张师本, 卢远征, 景秀春, 张放. 2007. 塔里木盆地奥陶纪地层划分与对比研究. 内部报告

图7 芙蓉统碳同位素曲线对比剖面图

岩标志层,与发现牙形刺化石的柯坪水泥厂剖面和永安坝剖面可很好对比;在距离舒探1井蓬莱坝组底部44m处的碳同位素负漂移之上有一个碳同位素正漂移,其上碳同位素值稳定降低,显示与塔东2井一致的特征,本文将该正漂移作为奥陶系/寒武系界线。位于塔北隆起的英探1井和位于塔中隆起的中深1井蓬莱坝组底部的岩性组合与柯坪露头区可对比性差,蓬莱坝组底界的划分是根据GR曲线(图2),可能并不准确;但蓬莱坝组中两个碳同位素正异常可以对比(图7)。根据舒探1井的划分方案,将中深1井奥陶系/寒武系界线定在5264m左右,将英探1井的奥陶系/寒武系界线定在6743m左右。

用钻孔岩屑(每米取一个样品)开展同位素地层的分辨率不如露头,因此本文探讨的奥陶系/寒武系界限提供一种方案用于跨相区芙蓉统地层对比;更精细的工作还是依托露头开展高分辨率碳同位素地层研究。

5 结论

(1) 首次在塔里木盆地识别出排碧阶的SPICE碳同位素正漂移,大致确定寒武系芙蓉统底界在塔西台地区处于下丘里塔格组中下部、在塔东盆地区处于突尔沙克塔格群底。

(2) 在生物地层框架大致约束的基础上,提出用碳同位素微弱负漂移之后的正漂移作为确定奥陶系/寒武系界线的同位素地层标志;该标志之上的碳同位素呈稳定降低的特征;据此确定了塔中隆起、塔东隆

起、塔北隆起和巴楚隆起的奥陶系/寒武系界线,初步建立了塔里木盆地跨隆起、跨相区的芙蓉统等时对比格架。

参考文献

- 陈永权,周新源,杨海军,潘文庆,李国会. 2010. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下丘里塔格组层序地层及其油气勘探意义. 地层学杂志, 34: 77-82
- 陈永权,严威,韩长伟,杨鹏飞,李铮. 2015. 塔里木盆地寒武纪-早奥陶世构造古地理与岩相古地理格局再厘定——基于地震地层证据的新认识. 天然气地球科学, 26: 1831-1843
- 成守德. 1985. 关于新疆寒武系的一些问题. 见: 新疆地质研究论文集. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 22-35
- 董熙平. 1999. 华南寒武纪牙形石序列. 中国科学D辑: 地球科学, 29: 339-346
- 高振家,彭昌文,李永安,朱成顺,章森桂. 1984. 新疆库鲁克塔格震旦纪、寒武纪地层划分和对比. 见: 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 1-105
- 樊茹,邓胜徽,张学磊. 2011. 寒武系碳同位素漂移事件的全球对比性分析. 中国科学: 地球科学, 41: 1829-1839
- 景秀春,邓胜徽,赵宗举,卢远征,张师本. 2008. 塔里木盆地柯坪地区寒武-奥陶系界线附近的碳同位素组成与对比. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 1284-1296
- 王朴,朱国贤. 1988. 新疆却尔克山寒武-奥陶系中笔石、牙形刺及三叶虫化石的新发现. 新疆地质, (2): 48-53
- 谢会文,能源,敬兵,朱永峰,王斌. 2017. 塔里木盆地寒武系-奥陶系白云岩潜山勘探新发现与勘探意义. 中国石油勘探, 22: 1-11
- 章森桂. 1982. 新疆库鲁克塔格寒武纪地层划分与动物群特征. 见: 新疆地质研究论文集. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 36-58

- 张太荣. 1990. 新疆库鲁克塔格寒武纪三叶虫动物群序列. 新疆地质, 8: 185–192
- 赵治信, 张桂芝, 肖继南. 2000. 新疆古生代地层及牙形石. 北京: 石油工业出版社. 2
- 赵宗举, 赵治信, 黄智斌. 2006. 塔里木盆地奥陶系牙形石带及沉积层序. 地层学杂志, 30: 193–203
- 赵宗举, 张运波, 潘懋, 吴兴宁, 潘文庆. 2010. 塔里木盆地寒武系层序地层格架. 地质论评, 56: 609–620
- 周棣康, 周天荣, 王朴. 1991. 塔里木盆地东北地区丘里塔格群的时代归属. 见: 中国塔里木盆地北部油气地质研究, 第一辑. 36–40
- 周志毅, 陈丕基. 1990. 塔里木生物地层和地质演化. 北京: 科学出版社
- 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 李国祥, 张俊明, 赵方臣, Ahn S Y, 苗兰云. 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 26–65
- 朱涛, 张二朋, 王洪亮, 徐学义, 陈隽璐, 周铁锁, 朱小辉, 李晶晶. 2013. 西北地区寒武纪岩石地层的划分与对比. 地层学杂志, 37: 361–368
- 朱兆玲, 林焕令. 1983. 新疆库鲁克塔格早寒武世西大山组的三叶虫. 古生物学报, 22: 21–30
- Ahlberg P, Axheimer N, Babcock L E, Eriksson M E, Schmitz B, Terfelt F. 2009. Cambrian high-resolution biostratigraphy and carbon isotope chemostratigraphy in Scania, Sweden: First record of the SPICE and DICE excursions in Scandinavia. *Lethaia*, 42: 2–16
- Chen Y Q, Zhou X Y, Jiang S Y, Zhao K D. 2013. Types and origin of dolostones in Tarim Basin, Northwest China: Petrographic and geochemical evidence. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 87: 467–485
- Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate. *Earth Planet Sci Lett*, 120: 409–430
- Kaufman A, Knoll A. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Res*, 73: 27–49
- Kouchinsky A, Bengtson S, Gallet Y, Korovnikov I, Pavlov V, Runnegar B, Shields G, Veizer J, Young E, Ziegler K. 2008. The SPICE carbon isotope excursion in Siberia: A combined study of the upper Middle Cambrian-lowermost Ordovician Kulyumbe River section, northwestern Siberian Platform. *Geol Mag*, 145: 609–622
- Miller J F, Ethington R L, Evans K R, Holmer L E, Loch J D, Popov L E, Repetski J E, Ripperdan R L, Taylor J F. 2006. Proposed stratotype for the base of the highest Cambrian stage at the first appearance datum of *Cordylodus andresi*, Lawson Cove section, Utah, USA. *Palaeoworld*, 15: 384–405
- Miller J F, Repetski J E, Nicoll R S, Nowlan G S, Ethington R L. 2014. The conodont *Iapetognathus* and its value for defining the base of the Ordovician System. Lund: Proceedings of the 3rd IGCP 591 Annual Meeting. 226–228
- Ng T W, Yuan J L, Lin J P. 2014. The North China Steptoean positive carbon isotope excursion and its global correlation with the base of the Paibian Stage (early Furongian Series), Cambrian. *Lethaia*, 47: 153–164
- Peng S C, Babcock L E. 2008. Cambrian Period. In: Ogg J G, Ogg G, Gradstein F M, eds. The Concise Geologic Time Scale. Cambridge: Cambridge University Press. 37–46
- Peng S C, Babcock L E, Cooper R A. 2012. The Cambrian Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M, Ogg G, eds. The Geologic Time Scale 2012. Oxford: Elsevier's Science & Technology. 489–507
- Ripperdan R L. 2002. The HERB Event: End of Cambrian carbon cycle paradigm? *Geol Soc Am Abstracts Programs*, 34: 413
- Saltzman M R, Runnegar B, Lohmann K C. 1998. Carbon isotope stratigraphy of Upper Cambrian (Steptoean Stage) sequences of the eastern Great Basin: Record of a global oceanographic event. *Geol Soc Am Bull*, 110: 285–297
- Sial A N, Peralta S, Ferreira V P, Toselli A J, Aceñolaza F G, Parada M A, Gaucher C, Alonso R N, Pimentel M M. 2008. Upper Cambrian carbonate sequences of the Argentine Precordillera and the Steptoean C-Isotope positive excursion (SPICE). *Gondwana Res*, 13: 437–452
- Sial A N, Peralta S, Gaucher C, Toselli A J, Ferreira V P, Frei R, Parada M A, Pimentel M M, Silva Pereira N. 2013. High-resolution stable isotope stratigraphy of the upper Cambrian and Ordovician in the Argentine Precordillera: Carbon isotope excursions and correlations. *Gondwana Res*, 24: 330–348
- Wang X F, Stouge S, Maletz J, Bagnoli G, Qi Y P, Raevskaya E G, Wang C S, Yan C B. 2019. Correlating the global Cambrian-Ordovician boundary: Precise comparison of the Xiaoyangqiao section, Dayangcha, North China with the Green Point GSSP section, Newfoundland, Canada. *Palaeoworld*, 28: 243–275
- Woods M A, Wilby P R, Leng M J, Rushton A W A, Williams M. 2011. The furongian (late Cambrian) steptoean positive carbon isotope excursion (SPICE) in Avalonia. *J Geol Soc*, 168: 851–862
- Zhu M Y, Zhang J M, Li G X, Yang A H. 2004. Evolution of C isotopes in the Cambrian of China: Implications for Cambrian subdivision and trilobite mass extinctions. *Geobios*, 37: 287–301
- Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. 2006. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. *Palaeoworld*, 15: 217–222

(责任编辑: 朱茂炎)