

晚古生代冰期研究进展

杨 兵^{1,2}, 夏浩东¹, 杨欣杰¹, 韦 一²

(1. 国土资源实物地质资料中心, 河北 三河 065200; 2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074)

摘 要:晚古生代冰期作为地质历史时期重要的地质事件,已成为目前地质学研究的热点之一。由于冰期事件在不同纬度地区表现不同,其沉积响应及相应的地质变化也就有明显的差异。国际上对不同纬度地区的冰期事件进行了详细研究,包括对高纬度地区的冰成岩地层学、中低纬度地区海平面变化及旋回地层学,以及低纬度地区的稳定同位素研究。系统总结了全球晚古生代3次冰期事件在不同纬度地区的沉积响应及其他地质变化规律,主要冰期记录包括冈瓦纳大陆冰成岩、中、低纬度地区全球冰川型海退事件,无机碳同位素全球同步性正漂移事件,以及大气中CO₂浓度变化,并进一步阐述了晚古生代冰期事件规模、演替规律及与全球气候和地质演化的关系。在此基础上提出了冰期研究中存在的问题和未来研究展望。

关键词:晚古生代;冰期;冰成岩;海平面变化;同位素

中图分类号:P512.4

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2016)02-0140-12

晚古生代冰期是地球历史发展中最重要转折期之一,该时期全球范围内发生了由泥盆纪“温室地球”到石炭纪—早二叠世“冰室地球”的转变^[1],全球的古地理、古气候、古海洋、古生态均发生了显著变化。Crowell^[2]研究表明,该转折期共持续了约100 Ma,在此期间陆地维管植物大量繁盛,沉积碳库中有机碳含量增加,使得石炭纪—二叠纪成为全球一个重要的成煤期^[3];劳伦大陆与北非大陆在赤道附近碰撞形成造山带,导致全球的热循环传输方向和大洋环流都发生显著变化,使得大气圈CO₂分压下降,全球气候变冷,冈瓦纳大陆广泛发育冰川^[4-5];冰期—间冰期旋回所驱动的海平面变化^[6-7],导致欧美地区中低纬度旋回沉积序列的形成^[6,8-10];海洋生物在谢尔普霍夫(Serpukhovian)期末期发生了次一级的生物灭绝事件等^[11]。由此看来,晚古生代冈瓦纳大陆成冰作用不仅影响了南半球高纬度地区的气候和沉积特征,而且改变了当时整个地球大气圈的组成、海洋环境以及陆地生物的演化。

晚古生代冰期作为地球历史发展中重要的地质事件,已成为当今地学研究的热点之一^[7,10,12-18]。广大学者虽然通过不同方法建立多种模型来重建晚古生代冰期,并取得了重要成果。然而迄今为止,一些关于晚古生代冰期的核心问题,如冰期开始时间、终止时间、持续时间、冰川的活动范围、冰川类型、成冰事件期次以及冰川活动对地球系统在物理、化学、生

物等方面的影响仍未达成普遍的共识^[19],此外在冰川成因上,地学界也存在不同观点。

笔者将综合全球不同纬度地区晚古生代冰期研究的最新成果,总结晚古生代冰期事件的期次、冰成岩时空分布规律、冰期事件在中低纬度地区的地质响应,以及冰期事件的形成原因等。

1 冰期事件在不同纬度地区的响应

晚古生代冰期事件在不同纬度地区的响应有较大的差别,高纬度地区发育有冰成岩,可以通过对冰成岩的研究直接了解冰期事件。而在中低纬度地区冰期事件并未形成冰成岩,表现的只是海平面下降、生物圈及有机碳库的变化。因此,不同纬度地区对冰期事件的研究在方法手段上存有较大的差异。下面将综合不同纬度地区晚古生代冰期事件的研究成果,进而总结冰期事件的对比关系、冰期时间及期次。

1.1 高纬度地区冰成岩地层研究

冈瓦纳大陆高纬度地区的冰成岩是晚古生代冰期的直接反映,该研究方法主要是指对冰湖纹层沉积物、冰碛岩、冰筏沉积物、具冰川擦痕和磨光面的砾石以及冰川擦痕面的研究。一般认为,冰川的进退和冰筏沉积物分布范围的变化直接受全球气候的控制,在地质历史时期,每次冰筏沉积物和冰碛岩的出现均反映了一次变冷事件,通过冰成岩的分布区

收稿日期:2015-03-26

编辑:刘江霞

基金项目:中国地质调查局项目“实物地质资料汇交监管与筛选示范”(12120114080601);“全国立典型剖面调查”(2120113012400)

作者简介:杨 兵(1986—),男,工程师,主要从事地层古生物研究以及实物地质资料采集。E-mail:yangbinwbsy@126.com

通信作者:韦 一(1989—),女,现正攻读古生物学与地层学专业博士学位,主要从事青藏高原新生代地质研究。E-mail:WeiY712@gmail.com

域可以估算冰盖的分布范围。

前人研究表明,晚古生代最早的冰川沉积出现在巴西亚马逊盆地泥盆系—石炭系界线附近^[20-21],但该次发现的冰川沉积仅为小规模零星出露;冰筏沉积物及冰碛岩的大规模出现见于冈瓦纳大陆澳大利亚东部新英格兰褶皱带、Galilee 盆地、南美洲 Pagonzo、Canlingasta-Uspallta、central Patagonia、Precordillera、San Rafael、Tepuel、Tarija、Paraná 盆地以及中国西藏南部的吉隆、聂拉木、定结等地区,

其中早在密西西比亚纪维究期—谢尔普霍夫期中国西藏南部吉隆、聂拉木、定结地区的纳兴组、阿根廷 Precordillera 地区的 San Eduardo 群以及 Central Patagonia 地区的 Pampa de Tepuel 组均发现有大规模的冰成岩沉积物^[22-31]。宾夕法尼亚纪—早二叠世,冰成岩沉积物分布规模达到最大,广泛分布于冈瓦纳大陆的南美洲、非洲、阿拉伯半岛、马达加斯加、南极洲、印度和澳大利亚等地,也标志着地球进入了石炭纪—二叠纪的盛冰期^[6,12,22-30,32-34](图1)。

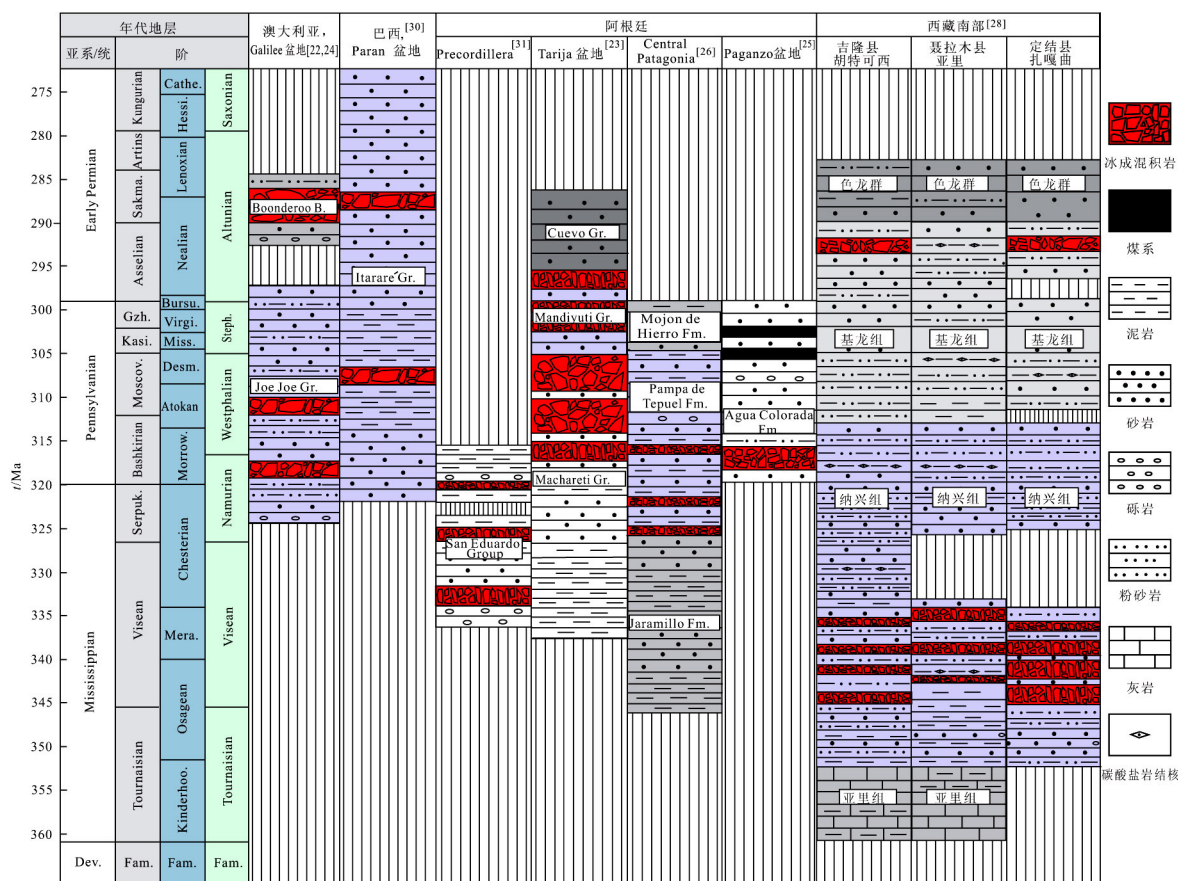


图1 石炭纪—二叠纪部分冰成岩地层分布图^[22-26,28,30-31]

Fig.1 Distribution of glaciogenic succession throughout the Carboniferous and Permian

1.2 中、低纬度地区旋回地层及冰川型海平面变化研究

1.2.1 中、低纬度地区旋回地层研究

Crowell^[35]认为中、低纬度地区旋回地层中间接保存了很多关于晚古生代冰期的精确内容。石炭纪联合古陆的形成导致了世界各地陆架区浅海沉积中周期性海平面升降以及沉积旋回具有全球同步性。目前绝大部分学者都认为晚古生代冈瓦纳冰期是控制该时期沉积旋回的主要因素,因此,不同地区以及不同板块之间的沉积相和层序地层对比也成为了可能。

目前北半球的旋回沉积主要分布在北美洲、欧洲西北部、俄罗斯台地、莫斯科盆地、乌拉尔山和中

国华南等地区^[10,36-49](部分见图2)。Veevers等^[6]认为晚古生代的旋回沉积最早形成于密西西比亚纪(Visean/Namurian界线)至早二叠世(Sakmarian/Artinskian界线)期间;Smith等^[10]和Wright等^[40]分别通过对北美洲Illinois盆地碎屑岩、碳酸盐岩混合旋回沉积和英国浅水碳酸盐岩台地的研究认为,晚古生代的旋回沉积最早始于Visean晚期。刘本培等^[48]、李儒峰等^[49]将中国黔南地区Triticites带地层划分为17个沉积旋回,并与北美中央大陆进行了对比,认为这些沉积旋回是当时存在冰川型全球海平面变化的有力证据。从前人研究成果中可以看出,晚古生代旋回地层均分布在维究阶(Visean)至萨克马尔阶(Sakmarian)之间,大部分旋回沉积的周

期在 44~4 300 ka 之间(表 1),与米兰科维奇旋回轨道参数的偏心率和斜度周期相似,且与该时期冰川的冰量变化波动同步,被认为是晚古生代冰期在旋回沉积中的记录。需要指出的是,在一些沉积旋回较薄、横向上不能延伸太远的沉积单元,可以通过海侵时形成的沉积物和海退时形成的古土壤在不同盆地中的对比来研究晚古生代冰期的变化。

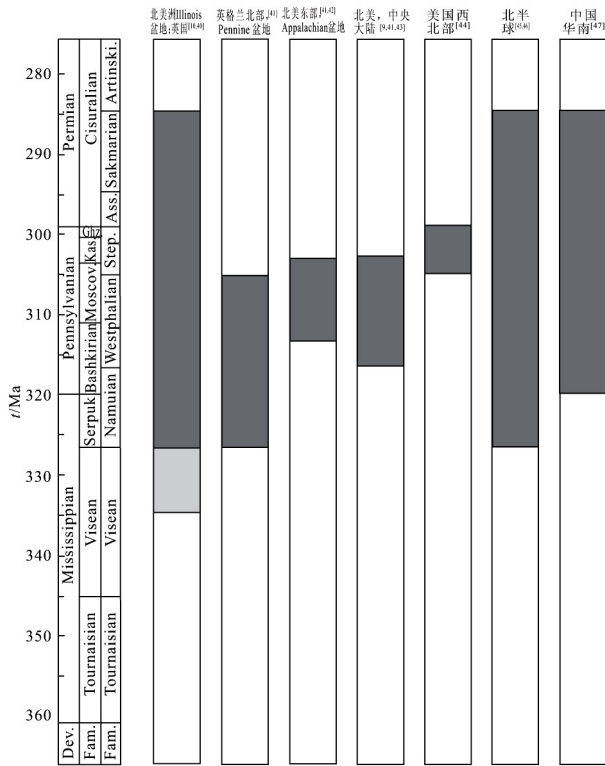


图 2 石炭纪—二叠纪部分旋回地层分布图^[9,10,40-47]

Fig.2 Distribution of cyclothems throughout the Carboniferous and Permian

表 1 上古生界旋回地层周期性海平面升降研究^[9,40-46]

Table 1 Eustatic periodicities estimated from Upper Paleozoic cyclothems

地区	岩石类型	持续年代	旋回周期
英国 ^[40]	碳酸盐岩	维宪期	100 ka
英格兰北部, Pennine 盆地 ^[41]		那缪尔期—维斯特法期	120 ka
北美东部, Appalachian 盆地	含煤的硅质碎屑岩旋回	巴什基尔期晚期—莫斯科期	a. 60~109 ka ^[41] b. 200~700 ka (平均 400 ka) c. 1.1~4.3 Ma (平均 2.5 Ma) ^[42]
北美,中央大陆 ^[9,41,43]	碎屑岩、碳酸盐岩混合旋回	维斯特法期—史蒂芬期中期	44~400 ka
美国西北 ^[44]	碳酸盐岩和碎屑岩、碳酸盐岩混合旋回	史蒂芬期	352~472 ka (平均 412 ka)
北半球 ^[45-46]		那缪尔期—萨克马尔期	2 Ma

1.2.2 中、低纬度地区冰川型海平面变化研究

在石炭纪—早二叠世冈瓦纳冰期,冰川的广泛发育导致全球海平面明显下降;在间冰期,极地冰川融化,规模变小,全球海平面上升。由于该时期北半球旋回沉积与南半球冈瓦纳大陆上的冰川沉积具有同时性,因此,北半球的海平面变化可能主要受控于冰川大小的波动。目前广大学者通过对冰川型海平面升降幅度的研究来判定各期成冰事件的规模,其研究手段包括地貌分析、沉积相分析、模型推算、地球化学指标分析等^[50](图 3)。

Crowley 等^[7]在前人基础上建立了海平面值升降估算模型,提出了海平面值与冰量之间的关系公式:

$$V_{we}=0.917\times V \quad (1)$$

$$SLE=V_{we}/(374.5\times 10^6\text{ km}^2) \quad (2)$$

$$SLEI=SLE-0.284\times SLE \quad (3)$$

式中: V 为冰体积; V_{we} 为冰融化成水的体积; SLE 为海平面等效值; $SLEI$ 为消除地壳抬升影响后海平面等效值; $374.5\times 10^6\text{ km}^2$ 为 Westphalian 期古海洋估算面积^[7,12]。

覃建雄等^[51]在四川龙门山地区石炭系中识别出 9 个三级层序以及若干个四级至五级高频层序,通过对比发现三级层序中有 4 个层序分别与冈瓦纳大陆晚古生代冰川事件中的 4 次间冰期—冰期旋回相对应,反映了该地区石炭纪层序受控于全球海平面升降旋回,成因与冰川型全球海平面变化有关。Elrick 等^[52]和 Read 等^[53]通过对 Lodgepole 组碳酸盐岩沉积序列和沉积相的研究发现,密西西比亚纪杜内期(Tournaisian)海平面升降幅度通常为 20~25 m,而 Matchen 等^[54]通过对俄亥俄州 Black Sandstone 的研究得出,杜内期(Tournaisian)冰期海平面下降幅度可达 60 m,并认为杜内期(Tournaisian)冰期分布十分局限;Wright 等^[40]通过分析 Bethel 和 Glen Dean 组碳酸盐岩中不整合面,认为维宪期(Visean)末期—谢尔普霍夫期(Serpukhovian)海平面的波动幅度为 10~100 m,对应着冈瓦纳大陆逐渐增加的冰川沉积;Rygel 等^[50]通过总结前人对北美洲和欧洲地层的研究成果得出,密西西比亚纪—宾夕法尼亚亚纪之交,海平面升降幅度为 20~100 m,其大幅度的海退对应着冈瓦纳广泛分布的冰川沉积。Joachimski 等^[55]认为宾夕法尼亚亚纪卡西莫夫期(Kasimovian)—早二叠世萨克马尔期(Sakmarian)全球海平面发生了明显降低,该时期全球海平面波动幅度为 120 m,表明全球进入了晚古生代盛冰期。随后在早二叠世—中二叠世全球海平面升降幅度为 30~70 m,表明冈瓦纳大陆成冰作用正在减弱^[50,56]。

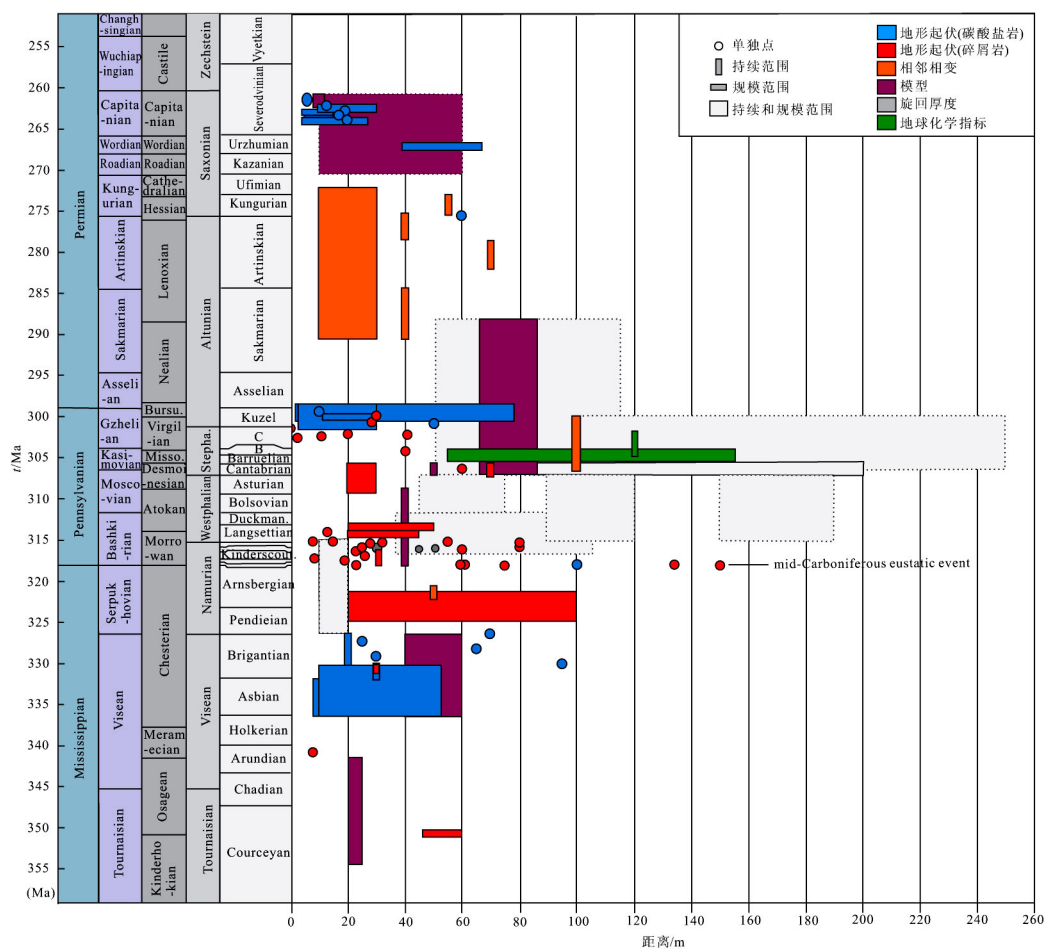
图 3 石炭纪—二叠纪冰川型海平面变化哈冰川沉积分布图^[50]

Fig. 3 Glacioeustatic estimates and the known distribution of glacial deposits throughout the Carboniferous and Permian

1.3 低纬度地区碳氧同位素地层研究

1.3.1 低纬度地区碳同位素地层研究

利用碳酸盐岩和古生物化石介壳骨骼同位素测试分析当时低纬度地区地层中冰川型海平面变化和稳定碳同位素记录,以此来重建晚古生代的碳循环以及成冰作用已成为当今地球科学和同位素地质研究的热点之一^[13,57-60]。Mii 等^[57]通过对北美中央大陆石炭系中保存较好的腕足类壳方解石碳氧同位素的研究认为,密西西比亚纪杜内期中期(Tournaisian)、谢尔普霍夫期(Serpukhovian)—巴什基尔期(Bashkirian)以及卡西莫夫期(Kasimovian)的碳氧同位素的正漂移反映了有机碳的大量埋藏,大气圈二氧化碳分压下降和全球气候变冷,标志着晚古生代冰期的开始,从而建立起了晚古生代冰期与碳氧同位素之间的对应关系。Frakes 等^[61]、Isbell 等^[12]通过对冰成岩地层、旋回地层研究,确定出晚古生代冰期有 3 次,并通过对比发现这 3 次冰期均与腕足类壳方解石的碳氧同位素的正漂移相对应(图 4)。此外,晚奥陶世以及新生代冰期与碳氧同位素的正漂移也有着良好的相关性^[57,60,64-66]。这些

发现为晚古生代冰期的研究提供了新视野。

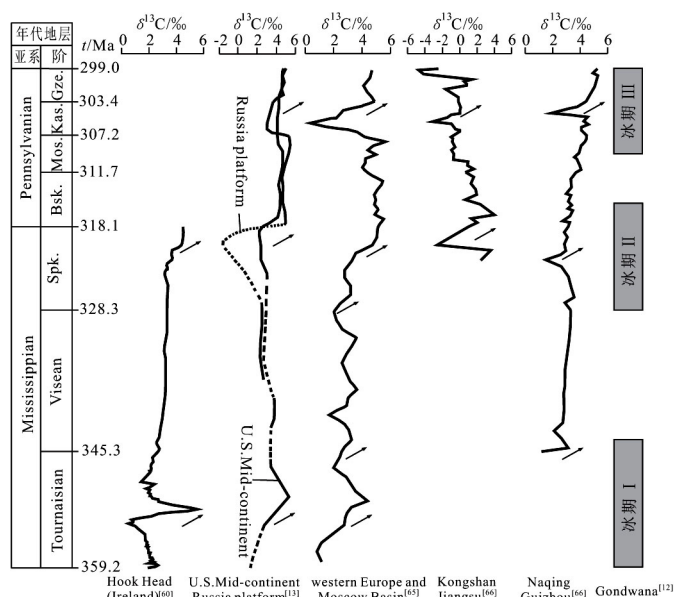
图 4 华南、欧美地区石炭系碳同位素曲线对比^[12,13,60,62-63]

Fig. 4 Comparison of carbon isotopic data among South China, Europe and America in Carboniferous

前人资料显示,在密西西比亚纪内期(Tournaisian)无机碳同位素发生了显著的正漂移,此次漂移具有全球性,可见于欧洲、北美中大陆、北美西部、俄罗斯台地以及中国华南等广大地区^[13,57-60,67-69]。这次正漂移在北美中央大陆和欧洲东部表现出的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值普遍大于6‰,偏移量一般大于6.5‰;北美西部内华达州 Arrow Canyon 剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值可达7.1‰,代表了显生宙以来碳同位素最大的事件之一。部分学者认为此次正漂移事件反映了有机碳的大量埋藏,二氧化碳分压的下降,全球气候变冷和石炭纪冰期的开始^[58-59,68,70]。此外,全球这次 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值的正向偏移都伴随着腕足壳和牙形石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值的升高,可能反映了全球气候的变冷和冈瓦纳大陆 Glacial I 的冰川事件^[12-13,57,60]。

据 Mii 等^[57]和 Grossman 等^[13]报道,北美中央大陆和俄罗斯台地腕足壳和牙形石碳氧同位素在密西西比亚纪/宾夕法尼亚亚纪界线附近表现为明显的正漂移;该时期在爱尔兰 Hook Head,中国江苏孔山、贵州纳庆、广西隆安等地区均可见 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值显著的正漂移^[65-66,68,70]。Isbell 等^[12]和 Grossman 等^[13]认为密西西比亚纪—宾夕法尼亚亚纪之交碳氧同位素的同时正向偏移,反映了冈瓦纳大陆冰量的明显增加和全球有机碳的大量埋藏,是全球碳循环和冈瓦纳大陆冰川之间存在紧密联系最有力的同位素证据,与冈瓦纳大陆 Glacial III 的冰川事件对应。

在俄罗斯台地, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值在巴什基尔期(Bashkirian)和莫斯科期(Moscovian)早期处于一个较高值稳定波动,莫斯科期(Moscovian)晚期 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值开始下降并在卡西莫夫期(Kasimovian)早期降至最低值,随后又开始上升并在格舍尔期(Gzhelian)早期达到最大值。在美洲中央大陆 Guadalupe Mountains 地区, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 值在莫斯科期(Moscovian)晚期下降^[13],且最低值集中在卡西莫夫期(Kasimovian)早期,随后又开始上升并在格舍尔期(Gzhelian)达到最大值^[13]。在中国华南宗地剖面、孔山剖面和纳庆剖面也可见类似演化趋势^[66]。由此可以看出该阶段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 的演化趋势具有全球性,反映了该阶段有机碳的大量埋藏和二氧化碳分压的下降。与此同时,通过对俄罗斯地台腕足壳 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 的研究发现,卡西莫夫期(Kasimovian)至阿瑟尔期(Asselian) $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 值也表现为正向偏移,也反映了冰川事件和相应的气候变冷,与冈瓦纳大陆 Glacial III 的冰川事件对应。

多年来的研究证实,由冰川冰量变化而引起的温度变化与 CO_2 浓度有很强的耦合性^[71-74],作为温室气体, CO_2 对全球的气候有着直接的影响,人们通常根据测试浅水腕足类、古土壤中的稳定碳同位

素组分来估算古大气中 CO_2 的浓度^[71-72]。为研究晚古生代冰期时大气中 CO_2 的变化,Montañez 等^[71]分别对 Midland 盆地、Pedregosa Anadarko、Paradox 盆地、Grand Canyon Embayment 等地古土壤中的方解石进行了稳定碳同位素测试,发现在早二叠世阿瑟尔期至萨克马尔期早期冈瓦纳大陆冰盖发育到最大时,大气中 CO_2 浓度恰好下降到最低值,到了萨克马尔期(Sakmarian)中期大气中 CO_2 浓度开始上升,冰盖开始融化;亚丁斯克期(Artinskian)早期大气中 CO_2 浓度再次下降,而此时在澳大利亚渐渐又发育较小的区域性高山冰川。Royer^[72]通过总结前人对奥陶纪至新近纪的研究数据发现,显生宙的变冷事件与大气中 CO_2 浓度有着极强的耦合性,所有变冷事件发生时大气中 CO_2 浓度均低于 $1\,000 \times 10^{-6}$,当该值小于 500×10^{-6} 时,广泛性大陆冰川就开始发育。在显生宙大气中 CO_2 浓度值降至 500×10^{-6} 基本可以作为冰川发育的临界值,但由于古生代日照时间较短,该临界值在古生代大于 500×10^{-6} 。据 Royer^[72]统计,在晚泥盆世和密西西比亚纪杜内期(Tournaisian)的冰期期间,大气中 CO_2 浓度分别约为 $1\,000 \times 10^{-6}$ 和 $1\,300 \times 10^{-6}$,且均处于 CO_2 浓度低值期;在宾夕法尼亚亚纪至二叠纪冰盛期(326~267 Ma),Frakes 等^[61]和 Isbell 等^[12]将其分为那缪尔期(Namurian)至维斯特法期(Westphalian)早期和史蒂芬期(Stephanian)至萨克马尔期(Sakmarian)中期2个成冰期,在这2个冰期阶段大气中 CO_2 浓度平均值均小于 500×10^{-6} 。而在宾夕法尼亚亚纪至二叠纪冰盛期这段时间前后大气中 CO_2 浓度均高于此阶段^[72]。

1.3.2 低纬度地区氧同位素地层研究

生物中的磷酸盐和方解石壳体中氧同位素的组分取决于当时的生长温度和生物体所处水体中的氧同位素组成,而后者与当时大陆上冰量的变化有着密切的关系^[75]。因此,人们通常根据生物壳体中的氧同位素值来建立温度梯度模型和由冰量引起的海平面变化估算模型。

最早的氧同位素值与温度函数是由 Longinelli 等^[76-77]根据测试现代生物磷酸盐壳体中的氧同位素与其平均生长温度的关系而建立的:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 111.4 - 4.3(\delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water}})$$

式中: $T(^{\circ}\text{C})$ 为生物体的平均生长温度; $\delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}}$ 为磷酸盐壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 为海水原始的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

随后 Kolodny 等^[78]在此基础上对函数作了进一步修订得出新函数:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 113.3 - 4.38(\delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water}})$$

而近期 Pucéat 等^[79]在可控温度和可控氧同位素组分的条件下对养殖鱼的骨骼进行了氧同位素测

试,并引入新参数实验室标样氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}_{\text{NBS120C}}$ 建立新公式:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 118.7 - 4.22[\delta^{18}\text{O}_{\text{phosphate}} + (22.6 - \delta^{18}\text{O}_{\text{NBS120C}}) - \delta^{18}\text{O}_{\text{water}}]$$

Chen 等^[75]对中国华南地区早二叠世阿瑟尔期(Asselian)至亚丁斯克期(Artinskian)的牙形石进行了氧同位素测试,得出该时期氧同位素变化范围为22‰~23‰,根据模型将海水原始氧同位素值设定为+1‰时,估算出当时该地区的古温度为26~30℃;当将海水原始同位素值设定为+0.5‰时,得出当时该地区的古温度为24~28℃^[75]。

在海平面变化方面,Schrag 等^[80]根据晚更新世末次冰期最大时的冰量总结出氧同位素值与冰川型海平面变化之间的规律,即: $\delta^{18}\text{O}$ 值每变化0.1‰就能引起10 m的冰川型海平面波动。Chen 等^[75]对中国华南和美国Guadalupe山脉地区空谷期(Kungurian)至卡匹敦期(Capitanian)牙形石进行了氧同位素分析得出,该时期氧同位素值最大波动为2‰,在假定早二叠世冰期时的冰量与晚更新世末次冰期最大时冰量相当的情况下^[60,81],估算出该时期冰川型海平面波动的最大值为200 m。而Ignacio Martinet 等^[82]认为晚古生代时期氧同位素值下降2‰相当于晚更新世末次冰期最大时赤道太平洋地区下降1.76‰和大西洋地区下降1.80‰;这些能导致晚更新世海平面下降120 m^[83-84]或130 m^[85-86]以及低纬度地区1~3℃^[87-88]或4~6℃^[89-90]的降温。

2 冰期时空分布

2.1 时间分布

零星分布的冰川沉积被发现于南美洲上泥盆统至密西西比亚系维宪阶(Visean),这些被认为是冈瓦纳冰期早期相对较小的冰盖沉积,较为连续的冰川记录则被发现于谢尔普霍夫阶(Serpukhovian)至萨克马尔阶(Sakmarian),而谢尔普霍夫期(Serpukhovian)被认为是广泛性冰期的开始^[6],在此基础上,Smith 等^[10]通过对Illinois盆地旋回地层精确研究,将该记录推早至维宪期中期(Visean)。Wang 等^[47]在中国华南地区密西西比亚系中识别出5次冰川性海退事件,分布时间分别为:晚泥盆世、中一晚杜内期、杜内期—维宪期之交、密西西比亚纪—宾夕法尼亚亚纪之交。Veevers 等^[6]通过对欧美地区层序地层的研究将晚古生代冰期分为3个阶段,分别为:泥盆纪末期冰期(I)、维宪期(Visean)冰期(II)、那缪尔期(Namurian)—萨克马尔期(Sakmarian)冰期(III),那缪尔期(Namurian)—萨克马尔期(Sakmarian)冰期(III)又进一步分为:那缪尔期

冰期(Namurian)(III A)、史蒂芬期(Stephanian)—阿瑟尔期(Asselian)早期冰期(III B)、阿瑟尔期(Asselian)早期—萨克马尔期(Sakmarian)冰期(III C)。其中冰期I、II属于零星分布的区域性高山冰川,冰期III属于广泛分布的全球性冰川。Fielding 等^[19]通过对新南威尔士、昆士兰及东澳大利亚等地的沉积记录研究发现晚古生代冰期是由一系列断续的成冰期构成,从石炭纪谢尔普霍夫期(Serpukhovian)至二叠纪卡匹敦期共发生8次成冰事件(图2),但该模式仅适合于东澳大利亚地区,是否适合于冈瓦纳大陆其他地区还需进一步研究。郗文昆等^[68,70]通过对中国广西隆安、南丹地区密西西比亚系沉积相以及同位素地层的研究,在密西西比亚纪识别出2次成冰事件,时间分别为杜内期(Tournaisian)中期—维宪期(Visean)、谢尔普霍夫期(Serpukhovian)—巴什基尔期(Bashkirian)早期。虽然到目前为止,对于晚古生代冰期的起止时间还存在一定的争议,但是广大学者普遍认同Frakes 等^[61]、Isbell 等^[12]划分出的3个主要冰期,分别为泥盆纪末期—杜内期(Tournaisian)(Glacial I),维宪期晚期(Visean)—谢尔普霍夫期(Serpukhovian)—巴什基尔期(Bashkirian)(Glacial II)和宾夕法尼亚亚纪末期—早二叠世亚丁斯克期(Artinskian)(Glacial III)(图5)。

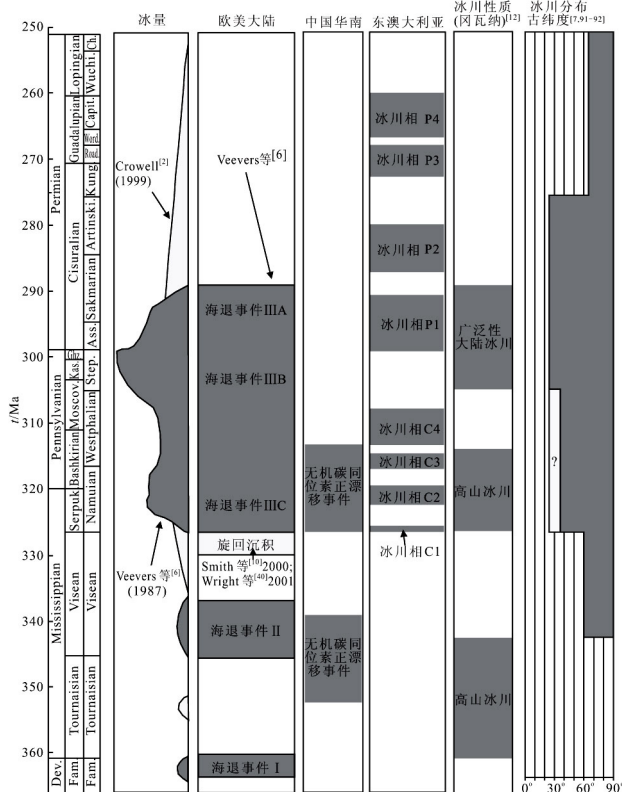


图5 晚古生代冰期时空分布、冰川性质图^[2,6-7,12,19,40,68,91-92]

Fig. 5 Timing, space distribution and character of the Late Palaeozoic Ice Age

2.2 空间分布

相对于冰期时间分布的初步认同,广大学者对于晚古生代 3 次冰期的冰川分布范围、冰量大小的认识仍然有较大的差异。

Crowley 等^[7]根据 Paterson^[93]提出的冰盖面积与冰量之间的关系公式:

$$\lg V=1.23[\lg S-1]$$

式中: S 为冰覆盖面积; V 为冰体积。

结合第四纪冰期中冰盖面积与冰量之间的关系得出晚古生代 3 次冰期的规模呈递增趋势,前两次冰川规模较小,宾夕法尼亚亚纪末期(305 Ma)第 3 次成冰作用达到最大,并估算出该次冰期冰川沉积物的分布范围约为 $40.0 \times 10^6 \text{ km}^2$,冰量约为 $108.4 \times 10^6 \text{ km}^3$,再根据各地区面积,估算出这 3 次冰期在区域上的成冰规模(表 2)。同时,Isbell 等^[12]也认为 Glacial I 和 Glacial II 的冰川沉积物分布区域较小,属于区域性高山型冰川发育的产物,而 Glacial III 的冰川沉积物在冈瓦纳大陆上广泛分布,其分布范围远远大于 Glacial I 和 Glacial II 的分布范围(图 6),达 $17.9 \times 10^6 \sim 22.6 \times 10^6 \text{ km}^2$,可与晚更新世末次大冰期相对比。从古纬度分布来看,密西西比亚纪冰川较小,大多分布于高纬度地区($>60^\circ$),宾夕法尼亚亚纪—早二叠世进入冰盛期,冰盖扩展到中低纬度($30^\circ \sim 40^\circ$)地区^[7,91-92]。与他们不同的是,Gonzalez-Bonorino 等^[96]则认为 Glacial II 的大陆冰盖的范围达到晚古生代以来最大,其面积约为 $21 \times 10^6 \text{ km}^2$,覆盖了从南美洲到印度的大部分地区,而 Glacial III 大陆型冰盖面积自 Glacial II 之后

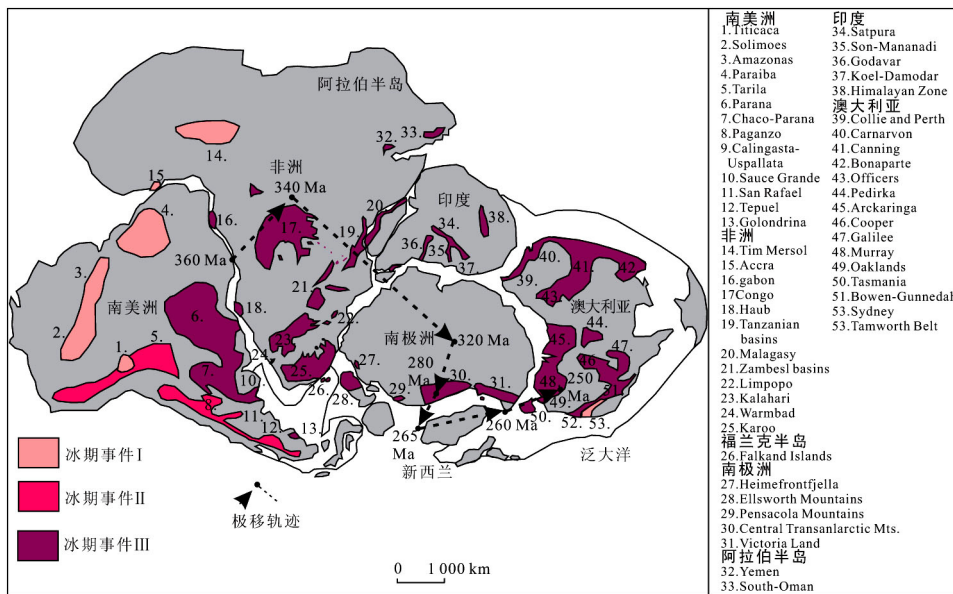
则发生明显减小,主要分布在受冰川影响的海洋边缘地区,其总面积约为 $12 \times 10^6 \text{ km}^2$,冈瓦纳大陆及其周缘广布的冰成沉积物主要是冰川海洋沉积物,并不能反映 Glacial III 冈瓦纳大陆上冰川的分布范围和冰量的大小。

表 2 冈瓦纳冰盖面积及冰量表^[7]

Table 2 Area and volume of Gondwana ice sheets

冰 盖	分布面积/ 10^6 km^2	冰量/ 10^6 km^3
West Gondwana	11.3	27.9
Indian	1.5	2.3
ICE I Australian	4.4	8.7
Andean	0.7	0.9
总量	17.9	39.8
West Gondwana	11.3	27.9
Antarctic-Indian	10.8	26.4
ICE II Australian	4.4	8.7
Andean	0.7	0.9
总量	27.2	63.9
West Gondwana	24.8	73.3
Antarctic-Indian	10.8	26.4
ICE III Australian	4.4	8.7
总量	40.0	108.4

然而近几年的一个研究成果又引起了新的争议:此前绝大数学者认为晚古生代冰期中 Glacial I 冰川分布范围最小,且局限于当时的高纬度($>70^\circ$)地区,而 Brezinski 等^[97-98]在美国东部的 Appalachia 盆地中发现有晚泥盆世的冰川沉积物,且沿沉积走向延伸了 400 多千米,而该盆地当时处于南纬 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间,这一新的发现表明 Glacial I 对地球系统的影响范围和程度可能远远超过了之前的认识。



冰期事件 I 和冰期事件 II 为零星分布的高山冰川沉积,冰期事件 III 为广泛分布的大陆型冰盖沉积

图 6 晚古生代冈瓦纳大陆冰川沉积物的时空分布图^[12,94-95]

Fig. 6 Timing,space distribution of Gondwana glaciation sediment in Late Palaeozoic

3 冰川诱发因素

导致引起晚古生代由“温室地球”向“冰室地球”转变的原因在地学界引起了广泛的讨论,相对多的讨论主要集中在构造和古生物因素,因为它们都影响了全球二氧化碳分压和全球温度的变化。最初 Veever 等^[6]认为石炭纪中期超大陆的形成导致中纬度地区有机质的大量埋藏可能是诱发晚古生代冰期的主要原因,而 Berner^[99]认为维管植物的繁盛是导致晚古生代冰期产生的一个至关重要的因素。此后众多学者围绕这2种因素做了大量研究工作。

3.1 构造因素

Saltzman 等^[58]研究表明,密西西比亚纪北美洲地区 Antler 造山带的隆起导致前陆盆地的形成,降低了水体的通透性,从而使得大量有机质在此埋藏下来,最终导致二氧化碳分压下降,引起全球气候变冷。同时 Saltzman^[5]还认为,石炭纪中期,劳伦大陆与北非大陆碰撞造成的阿帕拉钦—海西造山带的形成将古特提斯洋和冈瓦纳大陆分开,导致全球的热循环传输方向和大洋环流都发生明显变化,湿热气体向极地输送,湿冷气体由极地向外输送,最终导致冈瓦纳冰川的不断扩大(图7)。

3.2 生物因素

石炭纪陆上维管植物大量繁盛,有机碳储量增加,同时,陆上维管植物的繁盛加快了大陆硅酸盐的风化作用($\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$),消耗了空气中大量的二氧化碳,这2种作用均导致了大气

中二氧化碳分压的下降,引起全球气候变冷和晚古生代成冰作用的发生^[99]。

以上2种观点从不同角度分析了晚古生代冰川诱发原因,它们均与无机碳同位素有着密切的联系。从构造角度来看,造山运动导致地壳相对抬升,陆地面积增大,硅酸盐风化作用增强,使得大量的营养元素如:P、N、S等随着地表径流入海洋,从而促使海洋生物迅速生产,使得大量有机质埋藏起来,改变了自然界碳库的平衡,导致碳酸盐岩碳同位素正漂移;生物观点认为,石炭纪维管植物的大量繁盛使得环境中大量含 $\delta^{12}\text{C}$ 的 CO_2 被固定下来,造成环境中 $\delta^{12}\text{C}$ 相对贫乏, $\delta^{13}\text{C}$ 相对富集,从而产生了大气碳库中碳同位素的正向漂移。由此可以看出,无论是生物因素还是构造因素造成的成冰事件,它们对碳同位素造成的影响是一致的。

4 存在的问题

虽然经过广大学者多年的共同努力,对晚古生代冰期的研究已取得了重要进展,从低纬度地区到高纬度地区的研究均有重大突破,并在许多问题上达成了一致,但也存在一些问题。

(1)高纬度地区冰成岩地层研究方面 虽然冰成岩地层能直观地反映晚古生代的成冰时间和空间分布,但是受其地理分布和环境的制约存在一定的局限性,如,高纬度地区气温较低,古生物化石匮乏,且演化缓慢,形成的冰成岩地层通常缺乏精确的年龄对比依据。同时,由于晚古生代冰期存在多次成冰事件,形成多个冰期—间冰期旋回,早期形成的冰川沉积物可能被后期冰川所侵蚀。此外,广泛分布的大陆冰盖通常只能保存较为少量的陆相沉积记录。这些都不利于晚古生代冰期的研究。

(2)中、低纬度地区旋回地层及冰川型海平面变化研究方面 晚古生代冈瓦纳大陆、欧美大陆、西伯利亚都处于不同的板块,沉积基底的升降速率不一,大地构造背景和沉积环境有着明显的差异,同时古气候也表现出不同的特征,这就导致了同一次冰川事件在不同块体上的表现不同,因此就存在在同一次冰川事件上2个地区出现的海平面变化幅度不同的现象,这也给冰川规模的估算和全球对比带来了不便。

(3)低纬度地区稳定碳氧同位素地层研究方面 由于稳定碳氧同位素记录的受控因素众多,不能从单一的碳氧同位素的正漂移判定成冰事件,单一角度研究得出的结果往往会存在不同程度的偏差。

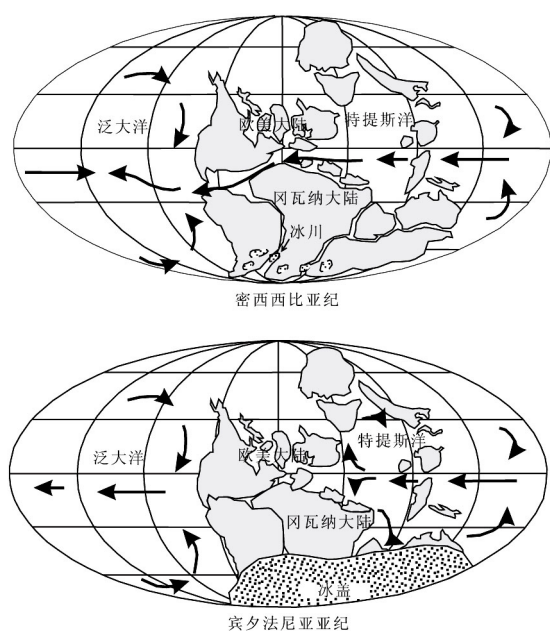


图7 石炭纪大洋环流、冰川分布以及古地理图^[5,6,10,100]

Fig. 7 Paleogeographic maps showing simplified ocean circulation and extent of glaciation

5 结论及研究展望

(1)通过冰成岩记录得出,冈瓦纳大陆晚古生代

出现 3 次冰期的时间分别为:泥盆纪末期—杜内期(Tournaisian)(Glacial I),维宪期晚期(Visean)—谢尔普霍夫期(Serpukhovian)—巴什基尔期(Bashkirian)(Glacial II)和宾夕法尼亚亚纪末期—早二叠世亚丁斯克期(Artinskian)(Glacial III),其中 Glacial I、Glacial II 为规模较小的高山型冰川,Glacial III 为广泛分布的大陆型冰川。

(2)北美洲、欧洲等地中、低纬度地区发生了 3 次较为明显的全球冰川型海退事件,其中,第 1 次发生在杜内期(Tournaisian),升降幅度 20~60 m;第 2 次发生在维宪期晚期(Visean)—谢尔普霍夫期(Serpukhovian),升降幅度 10~100 m;第 3 次发生在宾夕法尼亚亚纪卡西莫夫期(Kasimovian)—早二叠世萨克马尔期(Sakmarian),升降幅度约 120 m。3 次海退规模依次增大,反映了 3 次冰川规模呈增大趋势。

(3)在多数低纬度地区,无机碳同位素发生了 3 次全球同步性正漂移事件,分别为:杜内期(Tournaisian)、谢尔普霍夫期(Serpukhovian)—巴什基尔期(Bashkirian)早期、卡西莫夫期(Kasimovian)—格舍尔期(Gzhelian)。反映了无机碳同位素对晚古生代冰期在低纬度地区的响应。

(4)晚古生代冰事件与大气中 CO_2 浓度变化有着极强的耦合性,变冷事件均对应着大气中 CO_2 浓度的低值。

(5)造山运动导致前陆盆地的形成,降低了水体的通透性,从而使得大量有机质在此埋藏下来,最终导致二氧化碳分压下降,引起全球气候变冷。劳伦大陆与北非大陆碰撞造成的阿帕拉钦—海西造山带的形成将古特提斯洋和冈瓦纳大陆分开,导致全球的热循环传输方向和大洋环流都发生明显变化,湿热气体向极地输送,湿冷气体由极地向海外输送,最终导致冈瓦纳冰川的不断扩大。

此外,维管植物的大量繁盛加快了大陆硅酸盐的风化作用,消耗了空气中大量的二氧化碳,使得全球变冷,也是造成此次冰川事件发生的原因之一。

迄今为止,从广大学者的研究成果上看,绝大多数人往往从单一角度(如,同位素地层、沉积相分析、层序地层分析、冰成岩地层等)来解释古气候、古海洋和冰期—间冰期的冰量变化,缺乏综合系统的研究,且冰量估算因子的选取也过于单一。今后的研究应侧重于多种方法的联合应用。

参考文献:

- [1] Gastaldo R A, Dimichele W A, Pfeifferkorn H W. Out of the icehouse into the greenhouse: A Late Paleozoic analogue for modern global vegetational change[J]. *GSA Today*, 1996, 6 (10): 1-7.
- [2] Crowell J. Pre-Mesozoic ice ages: Their bearing on understand-

ing the climate system, Boulder, Colorado[J]. *Geological Society of America Memoir*, 1999, 192: 1-106.

- [3] Calder J, Gibling M. The Euramerican coal province: Controls on Late Paleozoic peat accumulation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 106(1/4): 1-21.
- [4] Tait J, Schatz M, Bachtadse V, et al. Palaeomagnetism and Palaeozoic palaeogeography of Gondwana and European terrane[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2000, 179(11): 21.
- [5] Saltzman M. Late Paleozoic ice age: Oceanic gateway or $p\text{CO}_2$? [J]. *Geology*, 2003, 31(2): 151-154.
- [6] Veevers J, Powell M. Late Paleozoic glacial episodes in Gondwanaland reflected in transgressive-regressive depositional sequences in Euramerica[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1987, 98(4): 475-487.
- [7] Crowley T, Baum S. Estimating Carboniferous sea-level fluctuations from Gondwana ice extent[J]. *Geology*, 1991, 19(10): 975-977.
- [8] Ross C A, Ross J R P. Late Paleozoic depositional sequences are synchronous and worldwide[J]. *Geology*, 1985, 13(3): 194-197.
- [9] Heckel P H. Sea-level curve for Pennsylvanian eustatic marine transgressive-regressive depositional cycles along midcontinent outcrop belt, North America[J]. *Geology*, 1986, 14: 330-334.
- [10] Smith L B, Read J F. Rapid onset of late Paleozoic glaciation on Gondwana: Evidence from Upper Mississippian strata of the Midcontinent, United States[J]. *Geology*, 2000, 28(3): 279-282.
- [11] Stanley S, Powell M. Depressed rates of origination and extinction during the late Paleozoic ice age: A new state for the global marine ecosystem[J]. *Geology*, 2003, 31(10): 877.
- [12] Isbell J, Miller M, Wolfe K, et al. Timing of late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of Northern Hemisphere cyclothems? [J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2003, 370: 5-24.
- [13] Grossman E, Yancey T, Jones T, et al. Glaciation, aridification, and carbon sequestration in the Permo-Carboniferous: The isotopic record from low latitudes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268(3): 222-233.
- [14] Isbell J L, Lenaker P A, Askin R A, et al. Reevaluation of the timing and extent of late Paleozoic glaciation in Gondwana: Role of the Transantarctic Mountains[J]. *Geology*, 2003, 31(11): 977-980.
- [15] Poulsen C J, Pollard D, Montanez I P, et al. Late Paleozoic tropical climate response to Gondwana deglaciation[J]. *Geology*, 2007, 35(9): 771-774.
- [16] Isaacson P, Diaz-Martinez E, Grader G, et al. Late Devonian-earliest Mississippian glaciation in Gondwanaland and its biogeographic consequences[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268(3/4): 126-142.
- [17] Soreghan G S, Soreghan M J, Poulsen C J, et al. Anomalous cold in the Pangaeen tropics[J]. *Geology*, 2008, 36(8): 659-662.
- [18] Bishop J, Montanez I, Gulbranson E, et al. The onset of mid-Carboniferous glacio-eustasy: Sedimentologic and diagenetic constraints, Arrow Canyon, Nevada [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 276(1/4): 217-243.
- [19] Fielding C, Frank T, Birgenheier L, et al. Stratigraphic imprint

- of the Late Palaeozoic ice age in eastern Australia: A record of alternating glacial and nonglacial climate regime[J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165(1): 129-140.
- [20] Caputo M. Late Devonian glaciation in South America[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1985, 51(85): 291-317.
- [21] Caputo M, Melo J H G, Streel M, et al. Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America[J]. *The Geological Society of America Special Paper*, 2008, 441(11): 1-13.
- [22] Jone A, Fielding C. Sedimentological record of the late Paleozoic glaciation in Queensland, Australia [J]. *Geology*, 2004, 32(2): 153-156.
- [23] Starck D, Papa C. The northwestern Argentina Tarija Basin: Stratigraphy, depositional systems, and controlling factors in a glaciated basin [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2006, 22(2/3): 169-184.
- [24] Whetten J T. Carboniferous glacial rocks from the Werrie Basin, New South Wales, Australia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76: 43-56.
- [25] Limarino C, Gutierrez P. Diamictites in the Agua Colorada Formation (northwestern Argentina): New evidence of Carboniferous glaciation in South America[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 1990, 3(1): 9-20.
- [26] Gonzalez-Bonorino G. Carboniferous glaciation in Gondwana: Evidence for grounded marine ice and continental glaciation in southwestern Argentina[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1992, 91: 363-375.
- [27] Veevers J. Pangea: Evolution of a supercontinent and its consequences for Earth's paleoclimate and sedimentary environments: Pangea: Paleoclimate, Tectonics, and Sedimentation During Accretion, Zenith, and Breakup of a Supercontinent[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1994, 288: 13-23.
- [28] Garzanti E, Sciunnach D. Early Carboniferous onset of Gondwanian glaciation and Neo-tethyan rifting in South Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148: 359-365.
- [29] Lopez-Gamundi O R, Buatois L A. Introduction: Late Paleozoic glacial events and postglacial transgressions in Gondwana[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2010, 468: 468.
- [30] Gesicki A L D, Riccomini C, Boggiani P C. Ice flow direction during late Paleozoic glaciation in western Paraná Basin, Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2002, 14(8): 933-939.
- [31] Gonzalez C R. Development of the Late Paleozoic glaciations of the South American Gondwana in western Argentina [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1990, 79(3/4): 275-287.
- [32] Visser J N J, Hall K J. Boulder beds in the glacio-genic Permo-Carboniferous Dwyka Formation in South Africa[J]. *Sedimentology*, 1985, 32: 281-294.
- [33] Visser J N J, Looek J C. Ice margin influence on glaciomarine sedimentation in the Permo-Carboniferous Dwyka Formation from the southwestern Karoo, South Africa[J]. *Sedimentology*, 1987, 34: 929-941.
- [34] Visser J N J. Glacial bedforms at the base of the Permo-Carboniferous Dwyka Formation along the western margin of the Karoo Basin, South Africa[J]. *Sedimentology*, 1990, 37: 231-245.
- [35] Crowell J C. Gondwana glaciation, cyclothems, continental positioning and climate change[J]. *American Journal of Science*, 1978, 278(10): 1345-1372.
- [36] Soreghan G S. Stratigraphic responses to geologic processes: Late Pennsylvanian eustasy and tectonics in the Pedregosa and Orogrande basins, Ancestral Rocky Mountains[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1994, 106(9): 1195-1211.
- [37] Barnett A J, Wright V P. A sedimentological and cyclostratigraphic evaluation of the completeness of the Mississippian-Pennsylvanian (Mid-Carboniferous) Global Stratotype Section and Point, Arrow Canyon, Nevada, USA[J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165(4): 859-873.
- [38] Gibling M R, Bird D J. Late Carboniferous cyclothems and alluvial paleovalleys in the Sydney Basin, Nova Scotia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1994, 106(1): 105-117.
- [39] Heckel P H. Origin of phosphatic black shale facies in Pennsylvanian cyclothems of mid-continent North America[J]. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1977, 61(7): 1045-1068.
- [40] Wright V, Vanstone S. Onset of Late Palaeozoic glacio-eustasy and the evolving climates of low latitude areas: A synthesis of current understanding[J]. *Journal of the Geological Society*, 2001, 158(3): 579-582.
- [41] Maynard J R, Leeder M R. On periodicity and magnitude of Late Carboniferous glacio-eustatic sea-level changes[J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(3): 303-311.
- [42] Chesnut D R J. Eustatic and tectonic control of depositional of the Lower and Middle Pennsylvanian strata of the central Appalachian Basin[C]//Dennison J M, Etensohn F R. Tectonic and eustatic controls on sedimentary cycles. Tulsa, Oklahoma: SEPM (Society for Sedimentary Geology) Concepts in Sedimentology and Paleontology, 1994, 4: 51-64.
- [43] Heckel P H. Evaluation of evidence for glacio-eustatic control over marine Pennsylvanian cyclothems in North America and consideration of possible tectonic effects[C]//Dennison J M, Etensohn F R. Tectonic and eustatic controls on sedimentary cycles. Tulsa, Oklahoma, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Concepts in Sedimentology and Paleontology, 1994, 4: 65-87.
- [44] Dickinson W R, Soreghan G S, Giles K A. Glacio-eustatic origin of Permo-Carboniferous stratigraphic cycles: Evidence from the southern Cordilleran foreland region[C]//Dennison J M, Etensohn F R. Tectonic and eustatic controls on sedimentary cycles. Tulsa, Oklahoma, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Concepts in Sedimentology and Paleontology, 1994, 4: 25-34.
- [45] Ross C A, Ross J R P. Late Paleozoic sea levels and depositional sequences[J]. *Cushman Foundation for Foraminiferal Research Special Publication*, 1987, 24: 137-149.
- [46] Ross C A, Ross J R P. Late Paleozoic transgressive-regressive deposition[C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea-level changes: An integrated approach. Tulsa, Oklahoma: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1988, 42: 227-247.
- [47] Wang X D, Qie W K, Sheng Q Y, et al. Carboniferous and Lower Permian sedimentological cycles and biotic events of South China[J]. *Geological Society*, 2013, 376: 33-46.
- [48] 刘本培, 李儒峰, 尤德宏. 黔南独山石炭系层序地层及麦粒蜓带

- 冰川型全球海平面变化[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1994, 19(5): 553-564.
- [49] 李儒峰, 刘本培, 赵澄林. 黔南 Triticites 带旋回层序碳同位素特征及冰川型海平面变化[J]. 地质学报, 1996, 70(4): 342-350.
- [50] Rygel M, Fielding C, Frank T, et al. The magnitude of late Paleozoic glacioeustatic fluctuations: A synthesis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78: 500-511.
- [51] 覃健雄, 曾允孚, 黄志勋, 等. 四川龙门山马角坝地区石炭纪层序地层及海平面变化研究[J]. 岩相古地理, 1996, 16(1): 19-33.
- [52] Elrick M, Read J F. Cyclic ramp-to-basin carbonate deposits, Lower Mississippian, Wyoming and Montana: A combined field and computer modeling study[J]. Journal of Sedimentary Research, 1991, 61(7): 1194-1224.
- [53] Read J, Kerans C, Weber L J, et al. Milankovitch sea-level changes, cycles, and reservoirs on carbonate platforms in greenhouse and ice-house worlds[M]. [S. l.]: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1995.
- [54] Matchen D, Kammer T. Incised valley fill interpretation for Mississippian Black Hand Sandstone, Appalachian Basin, USA: Implications for glacial eustasy at Kinderhookian-Osagean (Tn2-Tn3) boundary[J]. Sedimentary Geology, 2006, 191(1/2): 89-113.
- [55] Joachimski M, von Bitter P, Buggisch W. Constraints on Pennsylvanian glacioeustatic sea-level changes using oxygen isotopes of conodont apatite[J]. Geology, 2006, 34(4): 277-280.
- [56] Kerans C, Kempter K, Rush J, et al. Facies and stratigraphic controls on a coastal paleokarst, Lower Permian, Apache Canyon, west Texas[C]//Lindsay R F, Ward R F, Trentham R C, et al. Classic Permian Geology of West Texas and South-Eastern New Mexico; 75 years of Permian Basin Oil and Gas Exploration and Development? [S. l.]: West Texas Geological Society, 2000: 55-81.
- [57] Mii H, Grossman E, Yancey T. Carboniferous isotope stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1999, 111(7): 960-973.
- [58] Saltzman M, González L, Lohmann K. Earliest Carboniferous cooling step triggered by the Antler orogeny? [J]. Geology, 2000, 28(4): 347-350.
- [59] Saltzman M. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Lower Mississippian (Kinderhookian-lower Osagean), western United States: Implications for seawater chemistry and glaciation[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 2002, 114(1): 96-108.
- [60] Buggisch W, Joachimski M, Sevastopulo G, et al. Mississippian $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and conodont apatite $\delta^{18}\text{O}$ records: Their relation to the Late Palaeozoic Glaciation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 268: 273-292.
- [61] Frakes L, Francis J, Syktus J. Climate modes of the Phanerozoic[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [62] Bruckschen P, Oesmann S, Veizer J. Isotope stratigraphy of the European Carboniferous: Proxy signals for ocean chemistry, climate and tectonics[J]. Chemical Geology, 1999, 161: 127-163.
- [63] Buggisch W, Wang X D, Alekseev A S, et al. Carboniferous-Permian carbon isotope stratigraphy of successions from China (Yangtze Platform), USA (Kansas) and Russia (Moscow Basin and Urals) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 301(1): 18-38.
- [64] Marshall J. Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation[J]. Geological Magazine, 1992, 129(2): 143-160.
- [65] Saltzman M, Young S. Long-lived glaciation in the Late Ordovician?: Isotopic and sequence-stratigraphic evidence from western Laurentia[J]. Geology, 2005, 33(2): 109-112.
- [66] Zachos J, Kump L. Carbon cycle feedbacks and the initiation of Antarctic glaciation in the earliest Oligocene[J]. Global and Planetary Change, 2005, 47(1): 51-66.
- [67] Mii H, Grossman E, Yancey T, et al. Isotopic records of brachiopod shells from the Russian Platform: Evidence for the onset of mid-Carboniferous glaciation[J]. Chemical Geology, 2001, 175: 133-147.
- [68] 郝文昆, 张雄华, 杜远生, 等. 华南地区下石炭亚系碳同位素记录及其对晚古生代冰期的响应[J]. 中国科学: D 辑, 2010, 40(11): 1533-1542.
- [69] 陈波. 黔南石炭纪地层碳氧同位素研究及其古环境意义[D]. 北京: 中国科学院, 2008: 1-65.
- [70] Qie W K, Zhang X H, Du Y S, et al. Lower Carboniferous in isotope stratigraphy in South China: Implications for the Late Paleozoic glaciation[J]. Science China Earth Sciences, 2011, 4(1): 84-92.
- [71] Montañez I P, Tabor N J, Niemeier D, et al. CO₂-forced climate and vegetation instability during Late Paleozoic deglaciation [J]. Science, 2007, 315: 87-91.
- [72] Royer D L. CO₂-forced climate thresholds during the Phanerozoic[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(23): 5665-5675.
- [73] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. Nature, 1999, 399: 429-436.
- [74] Siegenthaler U, Stocker T F, Eric Monnin E, et al. Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene[J]. Science, 2005, 310: 1313-1317.
- [75] Chen B, Joachimski M M, Shen S Z, et al. Permian ice volume and palaeoclimate history: Oxygen isotope proxies revisited [J]. Gondwana Research, 2013, 24(1): 77-89.
- [76] Longinelli A, Nuti S. Revised phosphate-water isotopic temperature scale[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 19(3): 373-376.
- [77] Longinelli A, Nuti S. Oxygen isotope measurements of phosphate from fish teeth and bones[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 20(3): 337-340.
- [78] Kolodny Y, Luz B, Navon O. Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, I. Fish bone apatite-rechecking the rules of the game[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1983, 64(3): 398-404.
- [79] Pucéat E, Joachimski M M, Bouilloux A, et al. Revised phosphate-water fractionation equation reassessing paleotemperatures derived from biogenic apatite[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 298(1): 135-142.
- [80] Schrag D P, Hampt G, Murray D W. Pore fluid constraints on the temperature and oxygen isotopic composition of the glacial ocean[J]. Science, 1996, 272: 1930-1932.

- [81] Elrick M, Scott L A. Carbon and oxygen isotope evidence for high-frequency (104-105 yr) and My-scale glacio-eustasy in Middle Pennsylvanian cyclic carbonates (Gray Mesa Formation), central New Mexico[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 285(3): 307-320.
- [82] Ignacio Martinet J, Deckker P D, Chivas A R. New estimates for salinity changes in the Western Pacific Warm Pool during the Last Glacial Maximum: Oxygen isotope evidence[J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32(97): 311-340.
- [83] Fairbanks R G. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: Influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation[J]. *Nature*, 1989, 342: 637-642.
- [84] Peltier W R, Fairbanks R G. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25 (23/24): 3322-3337.
- [85] Yokoyama Y, Lambeck K, De Deckker P, et al. Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima[J]. *Nature*, 2000, 406: 713-716.
- [86] Mitrovica J X. Recent controversies in predicting post-glacial sea-level change[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(2): 127-133.
- [87] Barker S, Cacho I, Benway H, et al. Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy for past oceanic temperatures: A methodological overview and data compilation for the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24 (7/9): 821-834.
- [88] Hippler D, Eisenhauer A, Nägler T F. Tropical Atlantic SST history inferred from Ca isotope thermometry over the last 140 ka[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(1): 90-100.
- [89] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Late Glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascarán, Peru[J]. *Science*, 1995, 269: 46-50.
- [90] McCulloch M T, Tudhope A W, Esat T M, et al. Coral record of equatorial sea-surface temperatures during the penultimate deglaciation at Huon Peninsula[J]. *Science*, 1999, 283: 202-204.
- [91] Frakes L A, Francis J E. A guide to Phanerozoic cold polar climates from high-latitude ice-rafting in the Cretaceous[J]. *Nature*, 1988, 333: 547-549.
- [92] Crowley T J, Baum S K. Modeling late Paleozoic glaciation[J]. *Geology*, 1992, 20(6): 507-510.
- [93] Paterson W S B. Laurentide ice sheets: Estimated volumes during late Wisconsin[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1972, 10(4): 885-917.
- [94] Lopez-Gamundi O R, Buatois L A. Introduction: Late Paleozoic glacial events and postglacial transgressions in Gondwana[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2010, 468: 5-8.
- [95] Powell C, Li Z X. Reconstruction of the Panthalassan margin of Gondwana[C] // Veevers J J, Powell C M. Permian-Triassic Pangean basins and foldbelts along the Panthalassan margin of Gondwanaland; Boulder, Colorado. [S. l.]: Geological Society of America Memoir, 1994, 184: 5-9.
- [96] Gonzalez-Bonorino G, Eyles N. Inverse relation between ice extent and the late Paleozoic glacial record of Gondwana[J]. *Geology*, 1995, 23(11): 1015-1018.
- [97] Brezinski D K, Cecil C B, Skema V W, et al. Late Devonian glacial deposits from the eastern United States signal an end of the mid-Paleozoic warm period[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268(3/4): 143-151.
- [98] Brezinski D K, Cecil C B, Skema V W. Late Devonian glacial and associated facies from the central Appalachian Basin, eastern United States[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(1/2): 265-281.
- [99] Berner R. Atmospheric carbon dioxide levels over Phanerozoic time[J]. *Science*, 1990, 249: 1382-1386.
- [100] Popp B N, Anderson T F, Sandberg P A. Brachiopods as indicators of original isotopic compositions in some Paleozoic limestones[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1986, 97 (10): 1262-1269.

Late Paleozoic Ice Age: Review of Recent Progress

Yang Bing^{1,2}, Xia Haodong¹, Yang Xinjie¹, Wei Yi²

(1. Cores&Samples Centre of Land&Resources, Sanhe Hebei 065201, China;
2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Late Paleozoic Ice Age is the important geological event in earth history and has been the research focus. Because of the differential impact of the glaciation on the different latitudes, the response of sedimentary and geological changes also have obvious differences. Many scholars have conducted detailed studies in different latitudes on glacial events, including the glaciogenic succession (at high latitudes), the sea level changes, cyclothems stratigraphic (at middle latitudes) and the advance of stable isotopic (at low latitudes). We hereby summarize the implications of three Ice Ages during Late Paleozoic in different latitudes and other law of geological changes. The main records about these Ice Ages include moraines in Gondwana, glacial type regressions in middle-low latitude area, global positive drifts of inorganic carbon isotope values and changes of CO₂ density in atmosphere. We also expound the relationship between the times, scale, evolution of glaciation and relationship between global climate and geological evolution. On these basis, we point out the weaknesses and future research prospects in the study of Ice Age.

Key words: Late Palaeozoic; Ice Age; glaciogenic; the sea level changes; isotope