

王洪浩, 李江海, 李维波, 等. 冈瓦纳大陆古生代冰盖分布研究[J]. 中国地质, 2014, 41(6): 2132-2143.

Wang Honghao, Li Jianghai, Li Weibo, et al. A study of the distribution of ice sheets on Gondwana Supercontinent in Paleozoic[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2132-2143(in Chinese with English abstract).

冈瓦纳大陆古生代冰盖分布研究

王洪浩^{1,2} 李江海^{1,2} 李维波^{1,2} 周肖贝^{1,2} 马丽亚^{1,2} 刘仲兰^{1,2}

(1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871)

摘要: 基于冈瓦纳大陆主要板块冰川沉积地层的对比, 并结合古地磁方法对冈瓦纳大陆古生代主要冰期的冰盖分布范围进行再造, 认为冈瓦纳大陆在古生代主要经历了3次较大的冰期, 分别是: (1) 晚奥陶世—早志留世冰期、(2) 晚泥盆世—早石炭世冰期、(3) 晚石炭世晚期—二叠纪冰期。晚奥陶世—早志留世冰期冰盖主要分布在西冈瓦纳大陆; 晚泥盆世—早石炭世冰期冰盖主要分布在南美板块; 晚石炭世晚期—二叠纪冰期冰盖在冈瓦纳大陆主要组成板块上均有分布, 且冰盖存在时间最长, 分布范围最广。3次主要冰期冰盖的中心点位置均靠近南极点, 但并不完全重合, 可认为气温是影响冈瓦纳大陆上冰盖分布的主要因素, 但不是唯一的因素, 冰盖的分布范围还受到盆地动力学、地形、冰川属性以及其他具体因素的影响。同时结合在保山地块的野外工作以及前人的研究成果, 认为冈瓦纳大陆的3次冰期中, 仅晚石炭世晚期—二叠纪冰期对中国的陆块产生了影响, 且主要影响了中国的西南陆块群(包括保山地块、腾冲地块、拉萨地块、羌塘地块等)。

关键词: 冈瓦纳大陆; 古生代; 冰盖; 中国陆块

中图分类号: P512.4² **文献标志码:** A **文章编号:** 10100-3657(2014)06-2132-12

冈瓦纳大陆是新元古代末至古生代初由东冈瓦纳和西冈瓦纳大陆块体经过泛非造山运动形成的超级大陆^[1]。其规模小于前期的罗迪尼亚大陆和后期的泛大陆。冈瓦纳大陆主体上包括现今的南美、非洲、马达加斯加、印度、阿拉伯、东南极和澳洲等板块, 占全球大陆板块面积的2/3以上^[2-3]。

冈瓦纳大陆的形成主要与两条重要的造山带有关。一条是位于东、西冈瓦纳之间的莫桑比克造山带, 该带形成时间介于600~550 Ma^[4-5], 另一条造山带发育于东、西非之间并延伸到刚果和巴西东南部。之后, 冈瓦纳大陆作为一个整体运动。在石炭纪, 冈瓦纳北缘的南美—北非板块与北方的劳亚大陆碰撞

造山, 形成海西造山带, 冈瓦纳大陆并入泛大陆。到三叠纪南大西洋超级地幔柱开始活动(中大西洋岩浆岩省, 200 Ma), 到中侏罗世(约160 Ma)大西洋洋盆逐渐开始张开, 东冈瓦纳大陆顺时针旋离开西冈瓦纳大陆, 冈瓦纳大陆彻底裂解^[6-8]。

自板块构造理论提出以来, 许多学者开展过冈瓦纳大陆的再造研究, 并在此基础上对冈瓦纳大陆的古气候、岩相—生物古地理、古环境进行了探讨^[8-14]。研究表明, 古生代冈瓦纳大陆受到多期冰川作用的影响, 对研究全球早古生代气候变化以及指导矿产资源勘探有着重要意义^[15-19]。虽然前人对于古生代冈瓦纳大陆冰期的研究取得了一些成果, 但仍存在一

收稿日期: 2013-11-14; 改回日期: 2014-09-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973计划”(2009CB219302)项目资助。

作者简介: 王洪浩, 男, 1989年生, 博士生, 构造地质学专业; E-mail: whhpeking@163.com。

些问题有待于进一步深入探讨。如冈瓦纳大陆上主要的冰期的期次,冰盖在不同时期在冈瓦纳大陆的分布范围及分布规律,冈瓦纳大陆上冰盖范围何时达到最大,冰盖中心随着板块运动的迁移规律,以及冰期对中国陆块的影响等问题学界尚未有系统的解释。

本文在前人研究的基础上,基于古地磁方法对早古生代冈瓦纳大陆进行再造,并结合 IHS 全球盆地数据库以及相关野外工作,通过地质对比的方法,勾勒出早古生代冰盖在冈瓦纳大陆上的分布范围,并探讨冰盖随板块运动的迁移规律以及冰期对冈瓦纳周缘小陆块的影响。

1 冈瓦纳大陆主要板块地层对比研究

在全球尺度的冰期的研究中,同时代冰川沉积地层的对比是重要的研究手段。通过研究古生代冈瓦纳大陆上冰川沉积地层的分布,可以指导冈瓦纳大陆上冰盖的重建。本文以 IHS (Information Handling Services) 全球盆地数据库为基础,建立了非洲、南美、阿拉伯、印度、澳洲等构成冈瓦纳大陆主要板块的冰川沉积地层对比图(南极板块缺少盆地数据)。同时,在此基础上,参考了前人对于南极板块古生代地层的研究结果^[20-24],认为在东南级板块的西毛德皇后地、查尔斯王子山,分隔东南级和西南级的横贯南极山脉以及西南级的马丽伯德地均可见上石炭统一二叠冰碛岩(图1)。

从图中可以看出古生代冈瓦纳大陆上主要板块的冰川沉积地层主要集中分布于3个时代:(1)晚奥陶世—早志留世、(2)晚泥盆世—早石炭世、(3)晚石炭世晚期—二叠纪。其中晚石炭世晚期—二叠纪冰期存在时间最长,分布范围最广。

晚奥陶世—早志留世冈瓦纳大陆上的冰川沉积地层分布时间较短,且分布范围局限,主要集中在西冈瓦纳大陆(南美板块、非洲板块、阿拉伯板块等),东冈瓦纳大陆未见分布。其成因可能与晚奥陶世—早志留世冈瓦纳大陆的陆内造山运动有关,导致在西冈瓦纳大陆形成一系列的高地,有利于冰川的积累^[19]。晚泥盆世—早石炭世冈瓦纳大陆上的冰川沉积地层集中分布于南美板块,其他板块未见分布。晚石炭世晚期—二叠纪的冰川沉积地层在冈瓦纳大陆上主要

板块上均可见分布,此时,冈瓦纳大陆上的冰盖范围达到最大。其成因可能与劳俄板块与冈瓦纳板块碰撞,二者之间的海道被阻断,导致全球范围内的环流和气候发生变化有关^[25-27]。

基于地层对比和前人的研究结果,可以看出同期的冰川的地质记录在不同板块甚至盆地之间具有穿时性,寒武纪为温暖的时期,冈瓦纳大陆未见冰川沉积地层分布。冰川最早于晚奥陶世在北非的中部出现,冰盖中心之后逐渐迁移到巴西的北部,然后向西运动,于早志留世迁移到巴西的南部、非洲的南部、玻利维亚以及阿根廷北部。从志留纪开始到晚石炭世法门阶,冈瓦纳整体上处于相对温暖的环境,仅在南美部分盆地可见冰川沉积地层分布^[15]。

到晚石炭世,冰川在巴西以及非洲的部分地区出现。之后冰川范围逐渐增大到安第斯地区以及巴西北部,之后冰盖中心向东移动,在二叠纪对印度板块北部以及澳洲板块产生了巨大的影响,最终冰盖在晚二叠世从澳洲东部以及南极入海^[15]。

2 冈瓦纳大陆古生代主要冰期冰盖范围重建

由于冰川的剥蚀作用会导致不少地区出露的冰期沉积记录不完全,地层有缺失,造成对冰盖范围的重建存在一定的困难。本文在全球古地磁数据库(GPMDB 4.6)^[28]基础上,更新补充2004年之后的古地磁数据,并依据 V90 标准^[29],筛选品质因子 $Q \geq 3$ 的古地磁数据,它们是古板块位置成图的基础。然后采用“球面样条法”(Spherical Spline Method)^[30-32],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。在投影方式上选取(60°S, 0°)作为球面投影中心,并通过使用 Gplate、Gmap 等软件^[33-34]对冈瓦纳主要板块位置进行恢复(板块欧拉极数据见表1)。

相比前人的研究成果,笔者补充更新了国内及国际上发表的最新的古地磁数据(截止到2013年),并加强了高质量数据在板块再造中的权重(以数据的品质因子对数据进行加权),采用“球面样条法”^[30-32]对各个板块的视极移曲线进行拟合,使得各个板块运动的连续性和协调性更强。并在课题组前期对显生宙各个时代的全球岩相古地理研究的基础上^[35],协调板块之间的相对位置关系,对缺少古

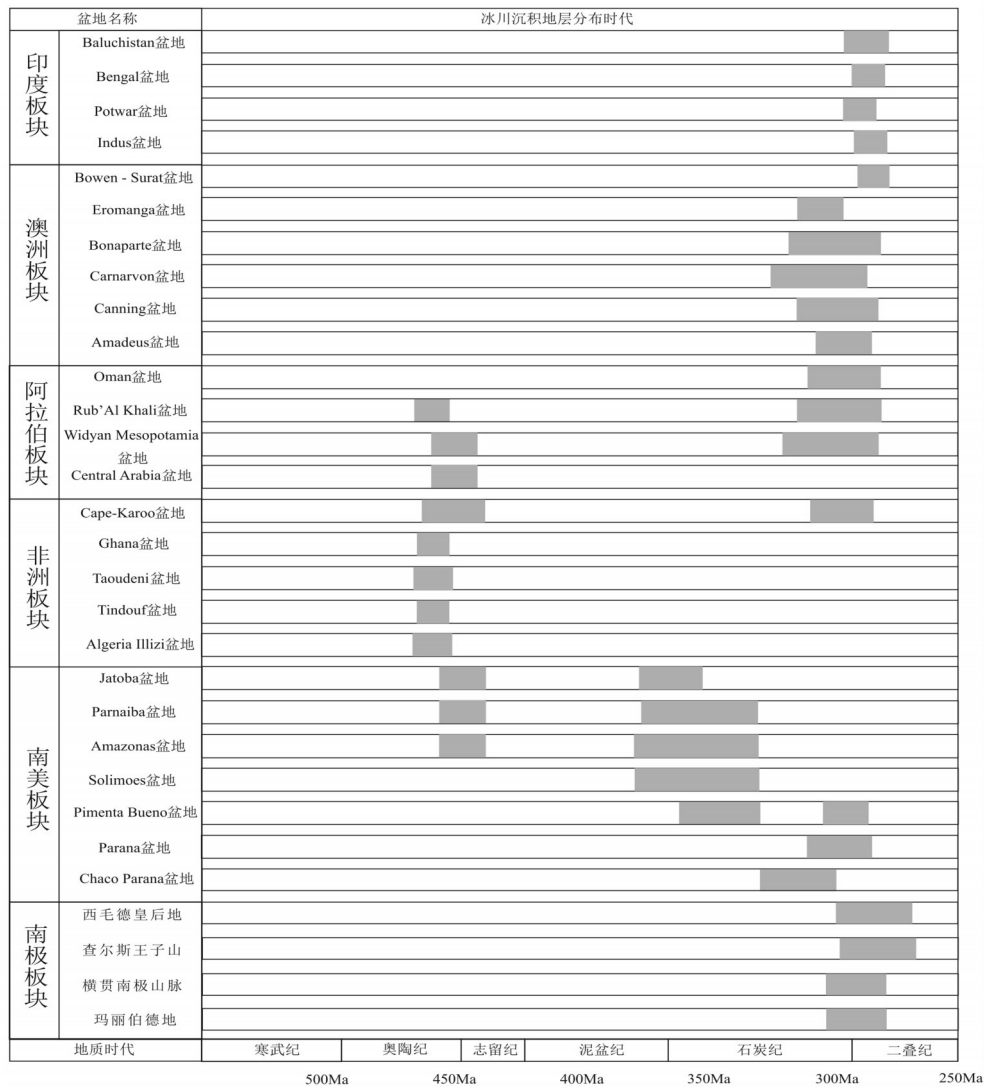


图1 古生代冈瓦纳大陆的主要板块的冰川沉积地层对比图(据 IHS 全球盆地数据库及文献[20-25])
Fig.1 Stratigraphic correlation of major plates which constituted Gondwana Supercontinent in Paleozoic

地磁数据的板块进行制约。笔者在冈瓦纳大陆再造的基础上,结合上述对冈瓦纳主要板块冰川沉积地层的研究,勾勒出冈瓦纳大陆古生代主要冰期的冰盖分布范围(图2)。

从早奥陶世开始,冈瓦纳大陆顺时针旋转,并整体上具有南移的趋势,到晚奥陶世,西冈瓦纳板块已到达南极点,东冈瓦纳板块基本处于温带与寒带之间^[36-37]。冈瓦纳大陆的南移伴随着全球气温的降低,从早奥陶世开始,气温逐渐降低,全球平均气温从5℃降为2℃左右^[38]。到晚奥陶世,全球海平面大约下降了100 m^[39],并在非洲、阿拉伯及南美洲东北部发育冰盖(图2)。但冰盖存续时间较短,早—中志留世,劳俄

大陆、西伯利亚板块和冈瓦纳大陆北缘均位于赤道附近,全球气候整体回暖,冰盖大面积消融,全球海平面开始上升,并在兰多维利统特列奇阶晚期^[40-41]或温洛克统侯默期早期达到高峰^[42],当时海平面的高度比现今海平面高约200 m^[38]。

泥盆纪处于地质历史时期海平面较低的时期^[43]。冈瓦纳古陆为大陆隆起区,北缘发育宽阔陆表海,南缘为两条山脉,分别由安第斯和新英格兰造山作用形成,是泛大洋向冈瓦纳大陆俯冲的产物。晚泥盆世—早石炭世,冰盖主要分布在南美,其他板块未见冰碛岩分布,可能是区域性的冰川事件。

冈瓦纳大陆与劳亚大陆碰撞形成了泛大陆,构

成石炭纪全球板块构造的基本格局。这一时期,全球造山活动强烈,非洲西北部与劳俄大陆东南缘沿南阿巴拉契亚山和麦西达(Meseta)山缝合;中欧洋闭合,俄罗斯(古欧洲)大陆与南欧小型陆块之间(如莫尔丹努布地块)的海西造山带形成;哈萨克斯坦微陆块与西伯利亚碰撞。到晚石炭世,随着乌拉尔洋和原特提斯洋的闭合,西哈萨克斯坦与波罗的板块拼接,乌拉尔造山带形成(此时期伏尔加—乌拉尔盆地的东侧发育绿色磨拉石沉积序列,而西侧则仍然发育生物礁)^[44],劳亚超大陆形成。与此同时,南美与劳亚大陆碰撞,莱茵洋闭合^[45],形成阿巴拉契亚山最南部分和沃希托(Ouachita)山脉;非洲东北部和阿拉伯地区随泛大陆大陆向北漂移;冈瓦纳大陆此时已位于南极附近。

广泛的造山事件导致全球范围内的环流和气候发生变化。晚石炭世,全球气候急剧变冷,南半球普遍有冰川活动,在冈瓦纳大陆的主要陆块上均可见冰碛岩分布。全球海平面明显低于泥盆纪^[46],平均气温较泥盆纪降低2℃以上^[39]。二叠纪,全球海平面继续下降,最终达到整个显生宙的最低值^[46],冰盖面积达到最大。到二叠纪末,全球气温开始回暖,冰盖范围开始缩小,西冈瓦纳板块冰盖最先消融,最终冰盖在晚二叠世从澳洲东部以及南极入海。于此同时,北半球至今尚未发现石炭—二叠纪冰川活动的证据。

从图2可以看出,冈瓦纳大陆古生代三次主要的冰期冰盖的中心均位于南半球较高纬度,靠近南极点,但并不与南极点重合。且冰盖中心在板块上的运动趋势与南极点在板块上的运动趋势大致一致^[15]。故可以认为,气温是影响冈瓦纳大陆上冰盖分布的主要因素,但不是唯一的因素,冰盖的分布范围还受到盆地动力学、地形、冰川属性以及其他具体因素的影响。

3 冈瓦纳大陆古生代主要冰期对中国陆块的影响

中国部分陆块(扬子板块、塔里木陆块、羌塘地块、拉萨地块等)在古生代初期位于东冈瓦纳大陆的北部,靠近澳大利亚和印度,古生代期间,上述陆块先后从冈瓦纳大陆裂解并北漂,直至加入北方的劳亚大陆^[47-48]。冈瓦纳大陆的三次主要冰期中,前

两次主要集中在西冈瓦纳大陆,对中国陆块群几乎没有影响。到晚古生代,扬子板块和塔里木陆块已从冈瓦纳大陆裂离^[49],故晚石炭世晚期—二叠纪冰期对中国陆块的影响主要局限在中国西南部的地体中,主要包括拉萨地块、羌塘地块、保山地块、腾冲地块等。本文通过对保山地块上石炭统一二叠统的野外考察,并结合前人对中国西南其他陆块上石炭统一二叠统的研究,来系统地探讨冈瓦纳大陆晚石炭世晚期—二叠纪冰期对中国西南陆块群的影响。

保山地块位于云南西部,是一个具有相对稳定的古生代—早中生代沉积序列的大陆地体。它东以澜沧江断裂、柯街断裂和南定河断裂为界与昌宁—孟连带相邻,西以怒江断裂为界与腾冲地块相邻^[50]。野外考察地层主要包括下石炭统铺门前组,下二叠统丁家寨组和卧牛寺组。其中上石炭统缺失。

保山地块下石炭统铺门前组下部为燧石条带灰岩夹白云质灰岩,上部可见鲕粒灰岩及生物碎屑灰岩,其中含有大量化石,常见的生物组分有钙藻类、有孔虫类、棘皮类、腕足类、介形类以及珊瑚和海绵骨针等(图3-a、b)。

丁家寨组地层在北部不整合覆盖于下石炭统铺门前组灰岩之上,下部以砂岩、粉砂岩为主,且普遍含砾,局部出现杂砾岩,砾石无分选、无磨圆;上部以粉砂岩为主,夹数层灰黑色页岩及灰岩,含珊瑚、腕足类和苔藓虫化石,南部区丁家寨组假整合覆于下泥盆统之上,岩性与北部区稍有差异,以泥岩、泥质灰岩、粉砂质泥岩为主,砾石成分较少,含丰富的腕足类化石。丁家寨组地层代表石炭纪中期抬升之后新沉积序列的开始,具有明显的冰海沉积相沉积的特征(图3-c、d)。20世纪80年代,丁家寨组曾因顶部所含蕨类化石绝大部分被鉴定为麦粒蕨(*Triticites*),而被认为是上石炭统顶部沉积。近年来对丁家寨组中上部所含的腕足动物化石^[51-53]以及顶部所含的蕨和牙形类化石^[54-55]的深入研究显示,丁家寨组的沉积时间很可能是萨克马尔期(Sakmarian)到阿丁斯克期(Artinskian)早期。由于丁家寨组不整合覆在下石炭统或更老地层之上,且底部化石稀少,因此其底界时代目前尚难以确定,有可能位于阿色林期(Asselian)。

位于冈瓦纳大陆东北侧的基默里陆块在早二

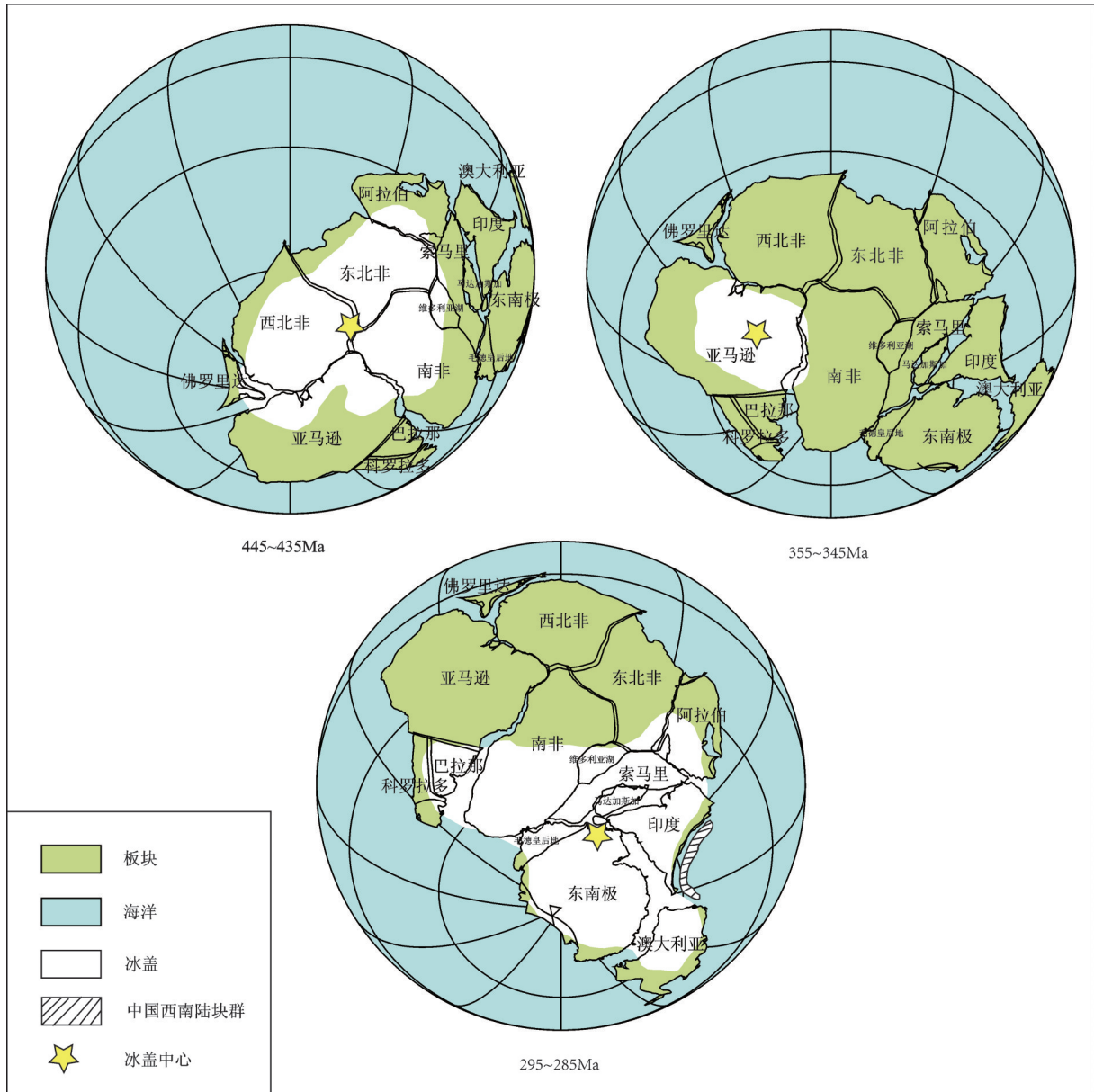


图2 冈瓦纳大陆古生代三个冰期冰盖分布图^[3,8-25]

Fig.2 Distribution of ice sheets on Gondwana Supercontinent during the three glacial events in Paleozoic

叠世晚期开始逐渐从冈瓦纳大陆分离。保山地块丁家寨组之上的卧牛寺组以大套的玄武岩和火山碎屑岩为主,打断了保山地块正常的海相沉积过程。从卧牛寺组在野外露头上的产出状态及岩石层段之间的关系上判断,卧牛寺组的玄武岩应集中喷发于一个相对较短的地质时期(图3-e,f)。地球化学特征显示,卧牛寺组玄武岩具有大陆拉斑玄武岩的特征,显示板内裂解的环境^[56-57],它的性质与克什米尔的本贾尔暗色岩系(Panjaj Volcanic Trap)相

一致。推测应为保山地块从冈瓦纳大陆主体裂解的证据。

除保山地块的丁家寨组地层外,中国滇西、西藏陆块群在晚石炭世一二叠纪普遍发育冰成沉积物。滇西腾冲地块上石炭统一下二叠统勐洪群下部发育灰色含砾粉砂岩和含砾砂岩,砾石成分为石英、硅质岩、砂岩等,呈次棱角状-次圆状,分选性差。中部为灰黑色含砾泥岩、粉砂岩,砾石成分为石英砂岩、硅质岩等,直径0.5~2 cm,呈次圆状,岩石

表1 440Ma、350Ma、290Ma 冈瓦纳主要板块的欧拉极数据

Table 1 Euler data of major plates which constituted Gondwana Supercontinent at 440Ma, 350Ma and 290Ma

| 板块名称 | 440Ma | | | 350Ma | | | 290Ma | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 欧拉极 | 欧拉极 | 欧拉旋 | 欧拉极 | 欧拉极 | 欧拉旋 | 欧拉极 | 欧拉极 | 欧拉旋 |
| | 纬度 | 经度 | 转角 | 纬度 | 经度 | 转角 | 纬度 | 经度 | 转角 |
| 佛罗里达板块 | 5.6 | 22.6 | 111.7 | 24.6 | 49.3 | 85.4 | 49.1 | 77.0 | 73.4 |
| 亚马逊板块 | 6.3 | 213.1 | -93.5 | 15.6 | 61.6 | 59.9 | 50.6 | 100.8 | 46.6 |
| 巴拉那板块 | 7.8 | 212.2 | -93.1 | 14.7 | 59.8 | 58.3 | 52.5 | 98.4 | 44.7 |
| 科罗拉多板块 | 7.7 | 211.4 | -93.2 | 15.0 | 58.8 | 58.4 | 53.3 | 96.5 | 45.1 |
| 印度板块 | 11.9 | 293.6 | -68.1 | 0.6 | 339.4 | -75.8 | 0.9 | 1.0 | -91.0 |
| 阿拉伯板块 | 5.6 | 22.6 | 111.7 | 4.4 | 295.7 | -73.7 | 1.9 | 333.4 | -63.6 |
| 马达加斯加板块 | 18.6 | 247.0 | -91.7 | 12.7 | 285.3 | -60.4 | 3.1 | 331.6 | -44.0 |
| 索马里板块 | 9.2 | 251.0 | -96.1 | 4.5 | 288.3 | -72.5 | 0.0 | 326.4 | -58.5 |
| 维多利亚湖板块 | 9.2 | 251.0 | -96.1 | 4.5 | 288.3 | -72.5 | 0.0 | 326.4 | -58.5 |
| 毛德皇后地板块 | 41.7 | 226.6 | -99.2 | 46.9 | 247.1 | -47.6 | 72.4 | 35.0 | -10.5 |
| 澳大利亚板块 | 47.5 | 242.0 | -74.9 | 50.8 | 306.5 | -31.6 | 7.0 | 37.3 | -32.5 |
| 东南极板块 | 41.7 | 226.6 | -99.2 | 46.9 | 247.1 | -47.6 | 72.4 | 35.0 | -10.5 |
| 西北非板块 | 9.1 | 249.7 | -97.3 | 4.5 | 286.4 | -72.9 | 0.3 | 144.2 | 57.8 |
| 东北非板块 | 9.1 | 251.5 | -96.6 | 4.6 | 288.6 | -73.3 | 0.5 | 326.3 | -59.2 |
| 南非板块 | 9.1 | 251.1 | -96.2 | 4.4 | 288.3 | -72.7 | 0.0 | 146.3 | 58.7 |

表面上可见擦痕,含腕足类 *Spiriferellina cristata*, *Marginijera sp.* 等冷水动物化石^[58]。

拉萨地块旁多地区上石炭统一二叠统旁多群下部为灰绿色中基性火山岩,火山角砾碎屑岩;上部为灰绿色含砾砂岩、黑色含砾板岩、黑板岩,含腕足类 *Bandopproductus*, *Chaiella*, *Leiorhynchoidea* 等,旁多群中含有冰川、冰筏沉积的坠石,指示其沉积环境是冰海相^[59]。拉萨地块申扎地区石炭系永珠组具有明显的韵律性,主要表现为岩性的粗细韵律性、坠石沉积的韵律性和化石出现的韵律性。在沉积上,该组自底部开始出现多层含砾板岩,表现出冰海相沉积的特点。组内生物灰岩夹层中含丰富的生物化石,具有典型冷水生物群的特征,如 *Uncinellina* 属于典型的冷水习性腕足类, *Cyathaxonia* 属于典型的冷水习性珊瑚类^[60]。南羌塘地块上石炭统一二叠统擦蒙组由砂岩、板岩、含砾板岩、含砾粉砂岩及辉绿岩等组成,含砾板岩和含砾粉砂岩中砾石大小悬殊,通常在1~3 cm,最大直径可达60 cm。砾石成分可见花岗岩、火山岩、石英岩、砾岩、板岩、片岩、石灰岩、大理岩等,部分砾石表面可见冰川擦痕,属于典型的冰海相沉积^[61]。

在对保山地块实地考察的基础上,并结合前人对于中国西南其他地块如腾冲地块、拉萨地块、羌塘地块上石炭统一二叠统的研究^[62-66],本文做出了中国西南陆块上石炭统一二叠统冰成杂砾岩

的柱状对比图(图4)。尽管学界目前对于上述地体的地层划分尚存较大争议,且各组的具体时限也没有得到详细的厘定。但主流观点普遍认为保山地块的丁家寨组、腾冲地块的勐洪群、拉萨地块旁多地区的旁多群、申扎地区的永珠组以及南羌塘地块的擦蒙组的形成时间介于晚石炭世一早二叠世之间^[62-68]。

从柱状图中可以看出,上述群、组中均可见较大套的冰成杂砾岩的沉积地层,并且部分地块在此杂砾岩之上可见冰海相的含砾砂岩,对比性较好。在晚石炭世一早二叠世,中国西南陆块群在构造属性上整体属于冈瓦纳大陆北缘的基默里地体,保山地块、腾冲地块、拉萨地块以及羌塘地块上石炭统一二叠统冰碛岩是冈瓦纳大陆晚石炭世晚期—二叠纪冰期影响中国西南陆块群的直接证据。在此基础上,本文在冈瓦纳冰盖再造图中补充增加了中国西南陆块群的位置(图2)。

4 结论

(1) 基于冈瓦纳大陆主要板块的地层对比研究,可以看出,冈瓦纳大陆在古生代主要经历了3次较大的冰期,分别是:①晚奥陶世—早志留世冰期,②晚泥盆世—早石炭世冰期,③晚石炭世晚期—二叠纪冰期。其中晚石炭世晚期—二叠纪冰期存在时间最长,分布范围最广。

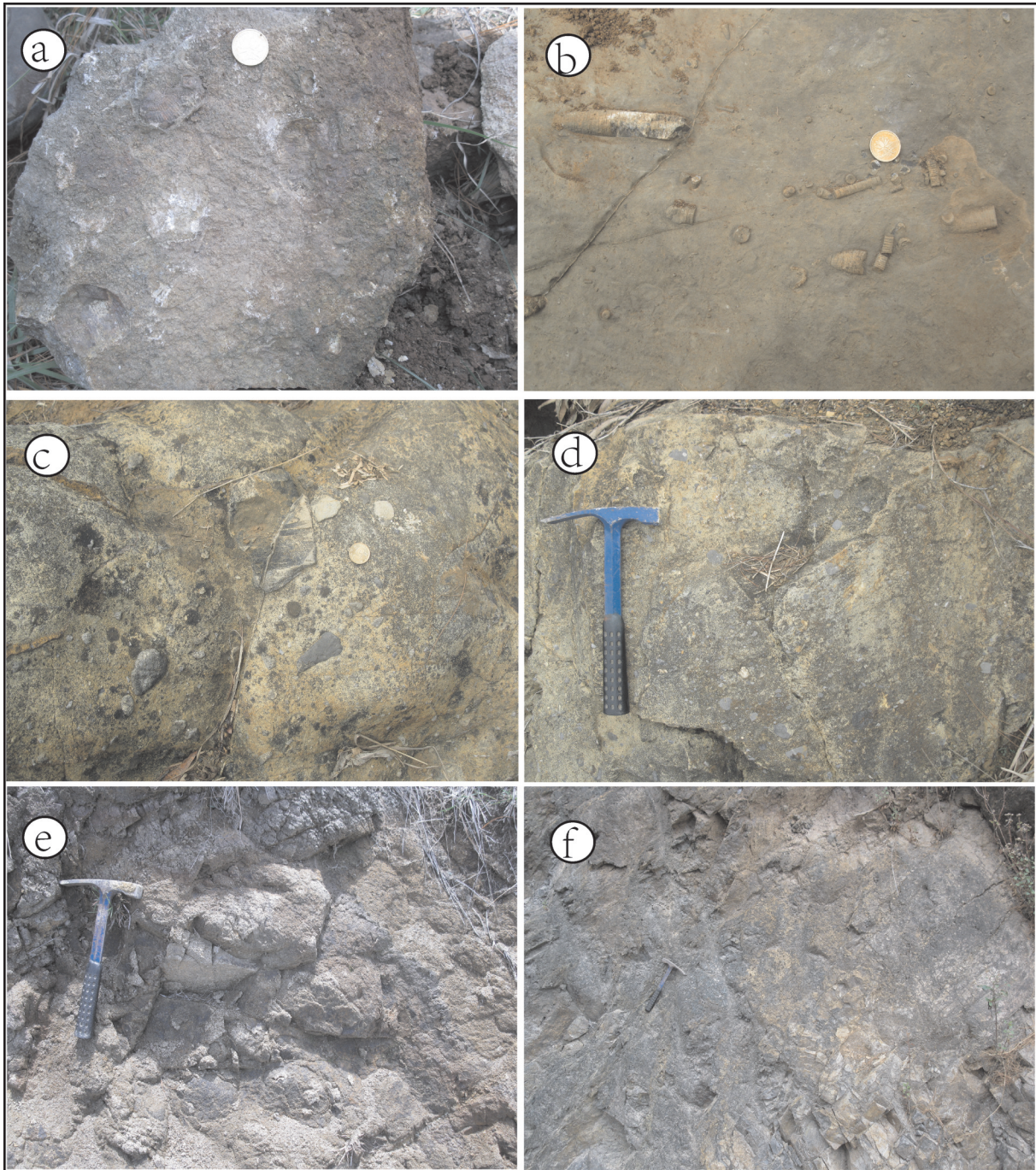


图3 保山地块野外相关照片

a,b—铺门前组生物碎屑灰岩,可见大量的珊瑚和腕足类化石;c,d—丁家寨组冰成杂砾岩,砾石成分多样,分选较差,磨圆较差;e,f—卧牛寺组大套的溢流玄武岩,表面可见明显的气孔构造

Fig. 3 Related photographs of the field of Baoshan Block

a,b—Bioclastic limestone in Pumenqian Formation, in which lots of brachiopoda and coral fossils can be seen; C, d—Tillite in Dingjiazhai Formation, with multiple pebble components and poor sorting and psepchicity; E, f— Flood basalt in Woniusi Formation, with obvious vesicular structure seen at the surface

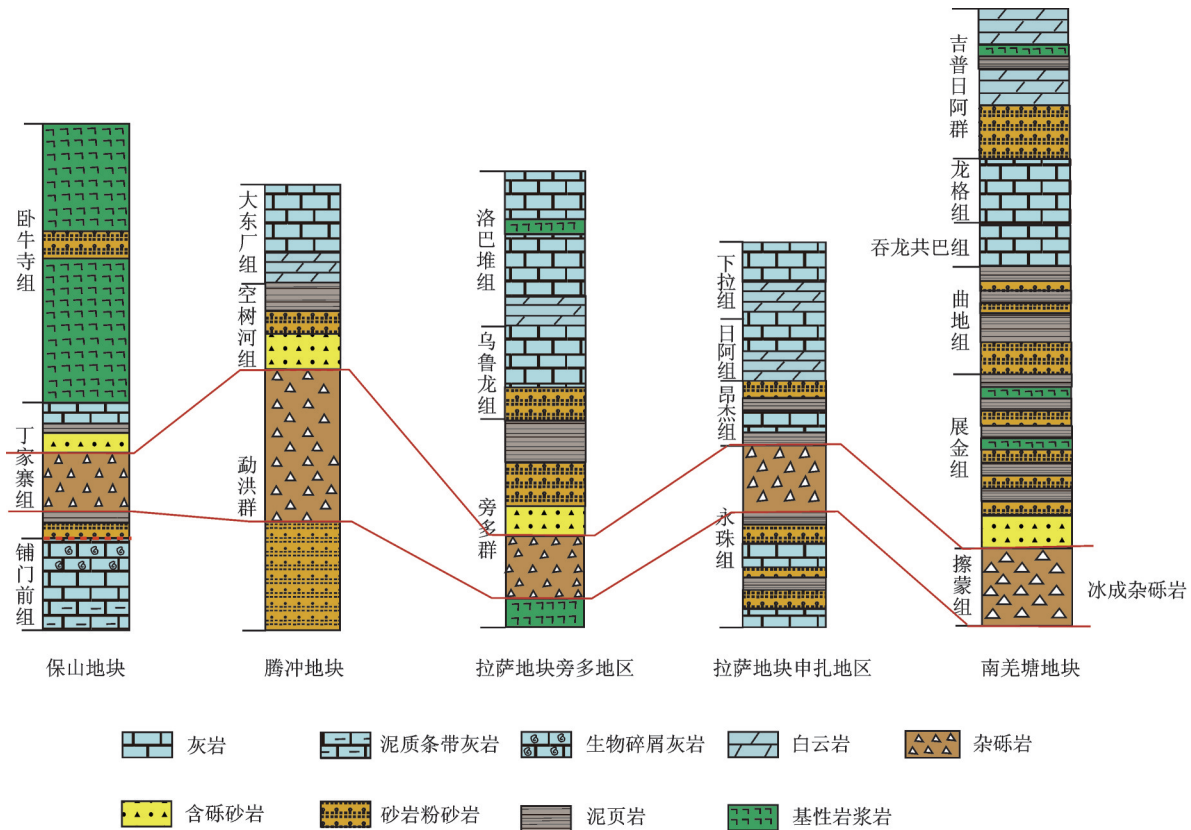


图4 中国西南陆块上石炭统一下二叠统冰成杂砾岩的层序对比图(据文献[51–65]修改)

Fig. 4 Sequence correlation of tillites of the blocks in southwest China in Upper Carboniferous– Lower Permian period

(2) 本文利用古地磁手段并结合地层对比结果对冈瓦纳大陆的3次冰期的冰盖分布范围进行再造,晚奥陶世—早志留世冰期冰盖主要分布在西冈瓦纳大陆;晚泥盆世—早石炭世冰期冰盖主要分布在南美板块;晚石炭世晚期—二叠纪冰期冰盖在冈瓦纳大陆主要组成板块上均有分布,且冰盖的面积在二叠纪达到最大,全球海平面下降到显生宙最低值。

(3) 冈瓦纳大陆上3次主要冰期冰盖的中心点位置均靠近南极点,但与南极点并不完全重合。且冰盖中心板块上的迁移趋势与冈瓦纳大陆的视极移曲线(以南极点为参考点)的运动趋势具有一致性,可以认为气温是影响冈瓦纳大陆上冰盖分布的主要因素,但不是唯一的因素,冰盖的分布范围还受到盆地动力学、地形、冰川属性以及其他具体因素的影响。

(4) 冈瓦纳大陆的3次冰期中,仅晚石炭世晚期—二叠纪冰期对中国的陆块产生了影响,且主要影响了中国的西南陆块群(包括保山地块、腾冲地块、

拉萨地块、羌塘地块等)。在中国西南陆块群的上石炭统一下二叠统沉积中,可见大套的冰成杂砾岩沉积,是冰川作用的直接证据。

致谢: 本文在成文过程中得到了课题组内部毛翔、李洪林、杨静懿、程雅琳、塔斯肯、张华添、崔鑫、许丽等研究生的帮助,在此表示感谢。同时,感谢审稿人和编辑李亚萍老师对本文的修改。

参考文献(References):

[1] 陆松年. 从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆——对新元古代超大陆研究几个问题的思考[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 442–449.
 Lu Songnian. From Rodinia to Gondwana Supercontinents——thinking about problems of researching Neoproterozoic supercontinents[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 442–449 (in Chinese with English abstract).
 [2] Torsvik T H, Cocks L R M. The Lower Palaeozoic palaeogeographical evolution of the northeastern and eastern peri-Gondwanan margin from Turkey to New Zealand[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 325(1): 3–21.
 [3] Torsvik T H, Cocks L R M. The Palaeozoic palaeogeography of

- central Gondwana[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2011, 357(1): 137–166.
- [4] Acharyya S K. Break up of Australia–India–Madagascar block, opening of the Indian Ocean and continental accretion in Southeast Asia with special reference to the characteristics of the peri–Indian collision zones[J]. Gondwana Research, 2000, 3(4): 425–443.
- [5] Gasquet D, Ennih N, Liégeois J P, et al. The Pan–African Belt[M]// Continental Evolution: The Geology of Morocco. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 33–64.
- [6] Dalziel I W D, Dalla Salda L H, Gahagan L M. Paleozoic Laurentia–Gondwana interaction and the origin of the Appalachian–Andean mountain system[J]. Geological Society of America Bulletin, 1994, 106(2): 243–252.
- [7] Van der Voo R. Paleozoic paleogeography of North America, Gondwana, and intervening displaced terranes: Comparisons of paleomagnetism with paleoclimatology and biogeographical patterns[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(3): 311–324.
- [8] Torsvik T H, Van der Voo R, Preeden U, et al. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics[J]. Earth–Science Reviews, 2012, 114(3): 325–368.
- [9] Ziegler P A, Stampfli G M. Late Palaeozoic–Early Mesozoic plate boundary reorganization: collapse of the Variscan orogen and opening of Neotethys[J]. Natura Bresciana, 2001, 25: 7–34.
- [10] Stampfli G M, Borel G D. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 196 (1/2): 17–33.
- [11] Hoffman P F. The break–up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the snowball Earth[J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 28(1): 17–33.
- [12] De Wit M J, Vitali E, Ashwal L. Gondwana Reconstruction of the East Africa–Madagascar–India–Sri Lanka–Antarctica fragments revised[J]. Centennial Geocongress, extended abstracts, 1995, 1: 218–221.
- [13] Scotese C R, Boucot A J, McKerrow W S. Gondwanan palaeogeography and paleoclimatology[J]. Journal of African Earth Sciences, 1999, 28(1): 99–114.
- [14] Lawver L A, Scotese C R. A revised reconstruction of Gondwanaland[J]. Geophysical Monograph Series, 1987, 40: 17–23.
- [15] Caputo M V, Crowell J C. Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era[J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96(8): 1020–1036.
- [16] Crowell J C. Gondwanan glaciation, cyclothems, continental positioning, and climate change[J]. American Journal of Science, 1978, 278(10): 1345–1372.
- [17] 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.
- [18] González–Bonorino G, Eyles N. Inverse relation between ice extent and the late Paleozoic glacial record of Gondwana[J]. Geology, 1995, 23(11): 1015–1018.
- [19] Smith A G. Estimates of the Earth's spin (geographic) axis relative to Gondwana from glacial sediments and paleomagnetism[J]. Earth–Science Reviews, 1997, 42(3): 161–179.
- [20] Lawver L A, Scotese C R. A revised reconstruction of Gondwanaland[J]. Gondwana six: structure, tectonics, and geophysics, 1987: 17–23.
- [21] McKelvey B C, Stephenson N C N. A geological reconnaissance of the Radok Lake area, Amery Oasis, Prince Charles Mountains[J]. Antarctic Science, 1990, 2(01): 53–66.
- [22] Veevers J J. Gondwana facies started when Gondwanaland merged in Pangea[J]. Geology, 1988, 16(8): 732–734.
- [23] Veevers J J, Saeed A. Central Antarctic provenance of Permian sandstones in Dronning Maud Land and the Karoo Basin: Integration of U–Pb and TDM ages and host-rock affinity from detrital zircons[J]. Sedimentary Geology, 2007, 202(4): 653–676.
- [24] 陈廷愚, 沈炎彬, 赵越, 等. 南极洲地质发展与冈瓦纳古陆演化[M]. 商务印书馆, 2008.
- Chen Tingyu, Shen Yanbin, Zhao Yue, et al. Geological development of Antarctic and evolution of Gondwanaland[M]. The Commercial Press, 2008(in Chinese).
- [25] van den Heuvel E P J, Buurman P. Possible causes of glaciations[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1974.
- [26] 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.
- [27] Smith L B, Read J F. Discrimination of local and global effects on Upper Mississippian stratigraphy, Illinois Basin, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(6): 985–1002.
- [28] Pisarevsky S. New edition of the global paleomagnetic database[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2005, 86(17): 170–170.
- [29] Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data[J]. Tectonophysics, 1990, 184(1): 1–9.
- [30] Buss S R, Fillmore J P. Spherical averages and applications to spherical splines and interpolation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2001, 20(2): 95–126.
- [31] Jupp P E, Kent J T. Fitting smooth paths to spherical data[J]. Applied Statistics, 1987, 36: 34–46.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Torsvik T H, Smethurst M A. Plate tectonic modelling: virtual reality with GMAP[J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25(4): 395-402.
- [35] 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.
Li Jianghai, Yang Jingyi, Ma Liya, et al. A study of the distribution of source rocks in Phanerozoic based on Paleo-plate reconstruction[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1683 - 1698(in Chinese with English abstract).
- [36] Golonka J. Phanerozoic paleoenvironment and paleolithofacies maps, Late Paleozoic[J]. *Geologia*, 2007, 33(2): 145-209.
- [37] Flöötman T, Gibson G M, Kleinschmidt G. Structural continuity of the Ross and Delamerian orogens of Antarctica and Australia along the margin of the paleo-Pacific[J]. *Geology*, 1993, 21(4): 319-322.
- [38] Munnecke A, Calner M, Harper D A T, et al. Ordovician and Silurian sea-water chemistry, sea level, and climate: A synopsis[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(3): 389-413.
- [39] Dowe P J, Hodgson D M, Worden R H. Prerequisites, processes, and prediction of chlorite grain coatings in petroleum reservoirs: A review of subsurface examples[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 32(1): 63-75.
- [40] Ross C A, Ross J R P. Silurian sea-level fluctuations[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1996, 306: 187-192.
- [41] Loydell D K. Early Silurian sea-level changes[J]. *Geological Magazine*, 1998, 135(4): 447-471.
- [42] Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. *Science*, 2008, 322(5898): 64-68.
- [43] Golonka J. Phanerozoic palaeoenvironment and palaeolithofacies maps of the Arctic region[J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2011, 35(1): 79-129.
- [44] 李斌, 朱筱敏. 伏尔加-乌拉尔典型前陆盆地石油地质特征及勘探前景分析[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(1): 47-52.
Li Bin, Zhu Xiaomin. Petroleum geology and exploration potential of Volga-Ural Basin: one typical foreland basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(1): 47-52(in Chinese with English abstract).
- [45] Dokuz A, Uysal İ, Kaliwoda M, et al. Early abyssal- and late SSZ-type vestiges of the Rheic oceanic mantle in the Variscan basement of the Sakarya Zone, NE Turkey: Implications for the sense of subduction and opening of the Paleotethys[J]. *Lithos*, 2011, 127(1): 176-191.
- [46] Golonka J, Ford D. Pangean (late Carboniferous- Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 161(1): 1-34.
- [47] 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. *中国科学*, 1998, 28(S1): 1-16.
Zhu Rixiang, Yang Zhenyu, Wu Hanning, et al. APWP and motion of China major blocks in Phanerozoic[J]. *Science in China*, 1998, 28(S1): 1-16(in Chinese with English abstract).
- [48] 黄宝春, 周姚秀, 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): 349-359.
Huang Baochun, Zhou Yaoxiu, Zhu Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 349-359(in Chinese with English abstract).
- [49] 王洪浩, 李江海, 杨静懿, 等. 塔里木地块新元古代-早古生代古板块再造及漂移轨迹[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 637-647.
Wang Honghao, Li Jianghai, Yang Jingyi, et al. Paleo-plate reconstruction and drift path of Tarim Block from Neoproterozoic to Early Paleozoic[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6): 637-647(in Chinese with English abstract).
- [50] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 1-28.
Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- [51] Shen S, Shi G R, Zhu K Y. Early Permian brachiopods of Gondwana affinity from the Dingjiazhai Formation of the Baoshan Block, western Yunnan, China[J]. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 2000, 106(3): 263-282.
- [52] Xiang-Dong W, Sugiyama T, Ueno K. Carboniferous and Permian stratigraphy of the Baoshan block, west Yunnan, southwest China[J]. *Newsletter of the Subcommittee on Permian Stratigraphy*, 1998: 32: 38-40
- [53] Shi G R, Archbold N W, Fang Z J. The biostratigraphical and palaeogeographical significance of an Early Permian brachiopod fauna from the Dingjiazhai Formation, Baoshan Block, Western Yunnan, China[C]//Proceedings of the IGCP Symposium on Geology of SE Asia, Hanoi, XI/1995. *Jour. Geology, Ser. B*. 1995, 5(6): 63-74.
- [54] Ueno K, Mizuno Y, Wang X, et al. Artinskian conodonts from the Dingjiazhai Formation of the Baoshan Block, West Yunnan, Southwest China[J]. *Journal Information*, 2002, 76(4): 741-750.
- [55] Ji Z S, Yao J X, Jin M C, et al. Early Permian conodonts from the Baoshan Block, western Yunnan, China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2004, 78(6): 1179-1184.
- [56] 黄勇, 郝家翔, 邓贵标, 等. 滇西施甸地区二叠纪卧牛寺组大陆溢流玄武岩的发现[J]. *地质通报*, 2012, 31(2/3): 314-320.
Huang Yong, Hao Jiaxiu, Deng Guibiao, et al. The discovery of terrestrial extrusive basalt of Permian Woniusi Formation in Shidian area, western Yunnan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3): 314-320(in Chinese with English abstract).
- [57] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南保山卧牛寺组玄武岩成因: 地幔

- 柱活动的产物?[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1): 20–28.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. Petrogenesis of the basalts of Woniusi Formation at Baoshan area, Yunnan: Is it of mantle plume origin? [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2003, 22(1): 20–28(in Chinese with English abstract).
- [58] 王义昭. 滇西腾冲、保山地区石炭系含砾地层特征及其意义[C]//青藏高原地质文集(11). 北京: 地质出版社, 1983: 71–77.
- Wang Yizhao. The characteristics and significance of Carboniferous gravel bed in Tengchong and Baoshan area, west Yunnan [C]// *Contribution to the Geology of the Qinghai–Xizang (TIBET) Plateau*(11). Beijing: Geological Publishing House, 1983: 71–77 (in Chinese with English abstract).
- [59] 纪占胜, 姚建新, 武桂春, 等. 拉萨北部旁多群砾石沉积的发现及其意义[J]. 地质通报, 2005, 24(6): 542–548.
- Ji Zhansheng, Yao Jianxin, Wu Guichun, et al. Discovery of dropstones in the Poindou Group, north Lhasa, Tibet, China, and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(6): 542–548 (in Chinese with English abstract).
- [60] 张树岐, 王永胜, 曲永贵. 西藏北部永珠地区石炭系永珠组岩石地层和古生物特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 980–987.
- Zhang Shuqi, Wang Yongsheng, Qu Yonggui. Lithostratigraphic and paleontological characteristics of the Carboniferous Yunzhug Formation in the Yunzhug area, northern Tibet[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 980–987(in Chinese with English abstract).
- [61] 梁定益, 聂泽同, 郭铁鹰, 等. 西藏阿里喀喇昆仑南部的冈瓦纳特提斯相石炭—二叠系[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1983, 1: 9–27.
- Liang Dingyi, Nie Zetong, Guo Tieying, et al. Permo–Carboniferous Gondwana–Tethys facies in southern Karakoram Ali, Xizang (Tibet) [J]. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 1983, 1: 9–27(in Chinese with English abstract).
- [62] Xiaochi J. Permo–Carboniferous sequences of Gondwana affinity in southwest China and their paleogeographic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(6): 633–646.
- [63] 杨欣德, 纪占胜, 臧文拴. 西藏林周旁多地区晚古生代层序地层特征[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 317–322.
- Yang Xinde, Ji Zhansheng, Zang Wenshuan. Characteristics of C–P sequence stratigraphy in northern margin of Gondwana Land—Exemplified by Pangduo Profile, Linzhou, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(4): 317–322(in Chinese with English abstract).
- [64] 纪占胜, 姚建新, 武桂春, 等. 拉萨林周地区下二叠统旁多群地层层序, 岩石学特征及其成因的研究[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 433–443.
- Ji Zhansheng, Yao Jianxin, Wu Guichun, et al. On the stratigraphic sequence, lithological characteristics and origin of the Lower Permian Pangduo Group in Linzhou County, Northern Lhasa, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4): 433–443(in Chinese with English abstract).
- [65] 詹立培, 姚建新, 纪占胜, 等. 西藏申扎地区晚石炭世—早二叠世冈瓦纳相腕足类动物群再研究[J]. 地质通报, 2007, 26(1): 54–72.
- Zhan Lippei, Yao Jianxin, Ji Zhansheng, et al. Late Carboniferous–Early Permian brachiopod fauna of Gondwanic affinity in Xainza County, northern Tibet, China: Revisited[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(1): 54–72(in Chinese with English abstract).
- [66] Wopfner H. Gondwana origin of the Baoshan and Tengchong terranes of west Yunnan[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 106(1): 539–547.
- [67] 夏国英, 丁蕴杰. 中国上石炭统上部及下二叠统海相地层中阶的划分[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 20–29.
- Xia Guoying, Ding Yunjie. Stages of upper Upper Carboniferous and Lower Permian marine strata in China[J]. *Geology in China*, 2002, 29(1): 20–29(in Chinese with English abstract).
- [68] 纪占胜. 西藏石炭—三叠纪沉积体系和古生物群演化规律及其地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006.
- Ji Zhansheng. The Carboniferous–Triassic sediment and biota evolutions in Tibet and their geological significances[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2006(in Chinese with English abstract).

A study of the distribution of ice sheets on Gondwana Supercontinent in Paleozoic

WANG Hong-hao^{1,2}, LI Jiang-hai^{1,2}, LI Wei-bo^{1,2},
ZHOU Xiao-bei^{1,2}, MA Li-ya^{1,2}, LIU Zhong-lan^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*; 2. *Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: In this study, the authors reconstructed the distribution of ice sheets on Gondwana Supercontinent in Paleozoic based on the methods of stratigraphic correlation and paleomagnetism. By studying the Paleozoic glacier deposits on the major plates of Gondwana, the authors have reached the conclusion that three major glacial events occurred on Gondwana Supercontinent in Paleozoic, which included (1) Late Ordovician–Early Silurian glacial event, (2) Late Devonian–Early Carboniferous glacial event, (3) the end of Late Carboniferous–Permian glacial event. The Late Ordovician–Early Silurian glacier event lasted a shorter period of time, and the glacier deposits were limitedly distributed on West Gondwana. Compared with the first glacier period, the ice sheets during the Late Devonian–Early Carboniferous glacier period were even smaller and mainly distributed in South America Plate, whereas the last glacial event lasted for the longest time and influenced the largest area, and the ice sheets were distributed on all the major plates which constituted Gondwana Supercontinent. Furthermore, the centers of ice sheets in the three glacial events were all close to the South Pole, but they were not completely coincident. It is thus held that the major factor affecting the distribution of ice sheets on Gondwana Supercontinent was the temperature. In addition, basin dynamics, topography, attributes of glacier and other specific factors could also affect the distribution of ice sheets. Combining the authors' field work in Baoshan Block with achievements of other researchers, the authors have reached the conclusion that only the Late Carboniferous–Permian glacial event had an effect on China's blocks, and mainly affected the blocks in Southwest China, including Baoshan Block, Tengchong Block, Lhasa Block and Qiangtang Block.

Key words: Gondwana Supercontinent; Paleozoic; ice sheet; China's blocks

About the first author: WANG Hong-hao, male, born in 1989, doctor candidate, majors in structural geology; E-mail: whhpeking@163.com.