中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 4 期: 992 ~ 1025
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

青藏高原及其周边奥陶纪综合地层、生物群与古地理演化

方翔[1,3], 甄勇毅[2], 王光旭[1,3], 魏鑫[1], 陈中阳[1,3], 梁艳[1,3], 武学进[1,3], 李文杰[1], 李超[1], 詹仁斌[1,3], 张元动[1,3*]

1. 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;
2. Geological Survey of New South Wales, W.B. Clarke Geoscience Centre, NSW 2753, Australia;
3. 中国科学院大学, 北京 100049
* 通讯作者, E-mail: ydzhang@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2023-02-23; 收修改稿日期: 2023-07-09; 接受日期: 2023-09-04; 网络版发表日期: 2024-03-20
第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0706)、国家自然科学基金项目(批准号: 42030510、42002009、42102013)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)项目(编号: XDB26000000)、现代古生物学和地层学国家重点实验室自主课题项目(编号: 20201104、20221103)和中国地质科学院地质调查项目(编号: DD20221829)资助

摘要 青藏高原奥陶系代表该地区未变质沉积地层的最古老记录, 是解读该地区早期地质历史和生物演化的关键层段. 青藏高原地区奥陶系底部地层存在不同程度的缺失, 但具有下奥陶统弗洛阶、中奥陶统达瑞威尔阶, 以及上奥陶统桑比阶、凯迪阶和赫南特阶, 可划分为喜马拉雅、冈底斯-察隅、羌塘-昌都、松潘-甘孜、喀喇昆仑-昆仑-阿尔金等地层区, 并可与周边的滇缅马、印支、柴达木-祁连、塔里木-天山和扬子区(西缘)等地层区进行综合地层对比. 笔石、牙形刺和头足类是青藏高原地区奥陶系最常见的、据以构建该地区生物地层框架的化石门类. 青藏高原奥陶纪生物群具有鲜明的生物古地理区系特色, 其中头足类在早-中奥陶世以珠角石类繁盛为特征, 显示与华北板块具有密切亲缘关系, 但到晚奥陶世则以喇叭角石和直角石类繁盛为特征, 表现出与华南的密切关系. 青藏高原的奥陶纪多门类动物群及其生物古地理演化, 为冈瓦纳东北缘地区的奥陶纪古板块重建提供了重要依据. 西藏南部喜马拉雅地体、拉萨地体及周边的滇缅马地体在寒武纪晚期-奥陶纪早期经历了库尔加克运动, 这次影响深远的构造热事件造成了奥陶纪地层与下伏基底地层之间的角度不整合接触关系, 这一间断面在青藏高原大部分地区存在. 西藏南部中奥陶统发育鲕粒灰岩和暖水生物群, 指示当时位于赤道附近的低纬度地带. 喜马拉雅地体及滇缅马地体的上奥陶统普遍发育大套具有网纹结构的海相碳酸盐岩红层, 可与华南扬子区的同期地层进行对比, 二者可能具有相同或相似的成因背景. 奥陶纪末全球性冰期与海平面下降事件也造成了滇西和缅甸掸邦等地区普遍缺失凯迪晚期地层, 对青藏高原的申扎和聂拉木等地区也有较大影响.

关键词 奥陶系, 年代地层, 岩石地层, 生物地层, 生物古地理, 生物和地质事件

中文引用格式: 方翔, 甄勇毅, 王光旭, 魏鑫, 陈中阳, 梁艳, 武学进, 李文杰, 李超, 詹仁斌, 张元动. 2024. 青藏高原及其周边奥陶纪综合地层、生物群与古地理演化. 中国科学: 地球科学, 54(4): 992–1025, doi: 10.1360/SSTe-2023-0039
英文引用格式: Fang X, Zhen Y Y, Wang G X, Wei X, Chen Z Y, Liang Y, Wu X J, Li W J, Li C, Zhan R B, Zhang Y D. 2024. Ordovician integrative stratigraphy, biotas, and paleogeographical evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas. Science China Earth Sciences, 67(4): 971–1004, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1184-6

© 2024 《中国科学》杂志社

1　引言

古地理研究表明，青藏高原地区及其周边地区在奥陶纪时期并不是一个整体，而是包括多个毗邻的或分离的块体，其范围与现在有一定差异. 其中青藏高原地区大体包括现在的西藏(喜马拉雅地区、冈底斯-察隅地区、羌塘-昌都地区)、青海、滇西地区(滇缅马地体)、喀喇昆仑-昆仑-阿尔金地区、扬子地区西部，以及巴基斯坦、印度北部、尼泊尔、不丹等南亚地区，其周边地区则包括澳大利亚西部、泰国西部和南部地区、缅甸东部掸邦地区、中国塔里木和滇中南地区(印支地体)以及越南北部地区(华南板块)(图1).

自20世纪50年代末以来，青藏高原及其周边地区奥陶系的研究一直持续到现在，但是至今没有统一的综合地层框架. 1959~1960年，中国第一支珠穆朗玛峰登山科学考察队开始对珠峰地区进行多学科的综合考察，并在1962年出版了《珠穆朗玛峰地区科学考察报告》(中国珠穆朗玛峰登山队科学考察队，1962). 其中，首次在地质学方面介绍了“世界屋脊”的综合情况. 1966~1968年, 中国科学院西藏科学考察队在对珠峰地区进行考察时，详细描述了喜马拉雅山北坡的奥陶系层序和多门类古生物化石(例如，王义刚，1974；陈均远, 1975; 余汶, 1975; 钱义元, 1976; 刘第墉, 1976).

“第一次青藏高原综合科学考察”正式启动于1973年，这是中国首次对青藏高原地区全面综合的科学考察. 通过这次考察，发现了更多的奥陶纪地层剖面，并进一步完善了珠穆朗玛峰北坡地区的奥陶系层序和动物群面貌(刘第墉，1979；尹集祥和郭师曾，1979). 1981~1984年，中国科学院青藏高原综合考察队开展了“青藏科考”第二阶段的科考工作——横断山地区综合科学考察，重点考察了滇西、藏东、川西、川北、甘南等地，详细描述了该地区的奥陶纪地层序列，在藏东地区首次发现奥陶纪地层和动物群(陈挺恩等，1986)，并对滇西地区奥陶系与志留系的界线进行了深入研究(陈挺恩, 1983a; 倪寓南等, 1983). 同时，中国科学院南京地质古生物研究所与四川省地质局开展了1:100万昌都幅的区域地质调查，对川藏交界地区的奥陶系进行了梳理和总结(四川省地质局区域地质调查队和中国科学院南京地质古生物研究所，1982a, 1982b, 1984, 1985). 1987~1992年，“青藏科考”的第三阶段——“喀喇昆仑-昆仑地区综合科学考察”正式启动. 这次考察重点针对中巴公路两侧至中哈国境线一带，通过新发现一些奥陶系露头，厘定了南疆甜水海、落石沟等地的奥陶纪地层层序(文世宣等，1998);

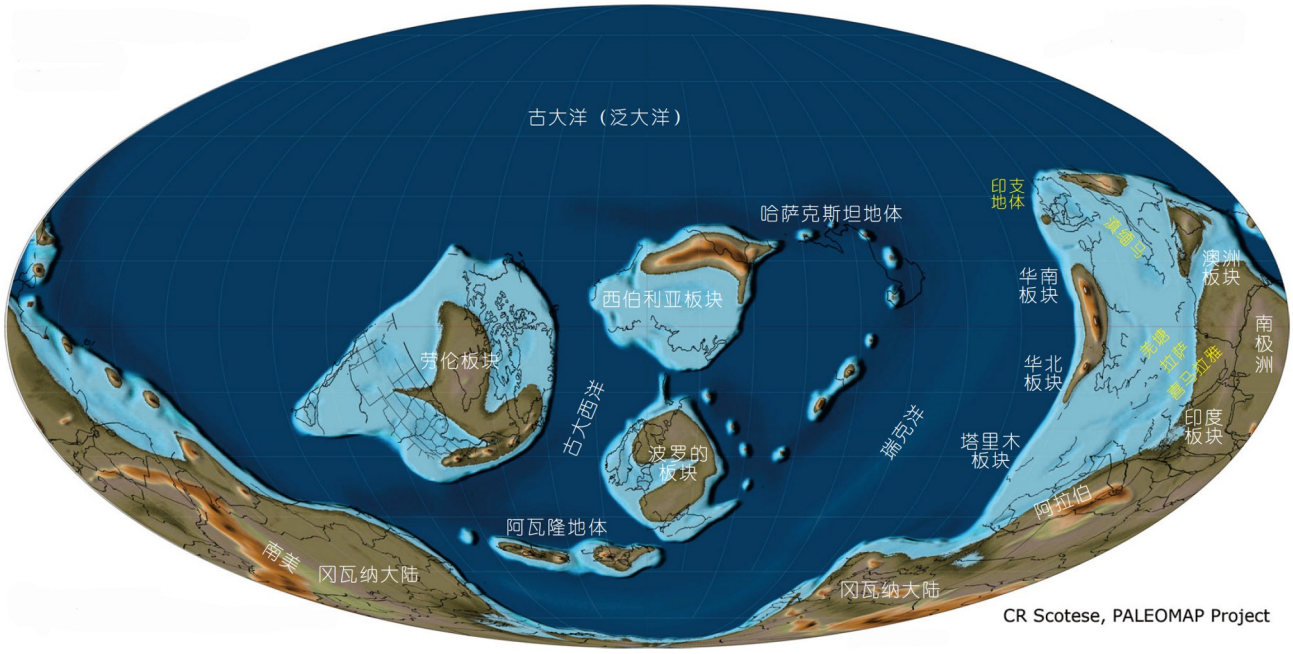


图 1　中奥陶世达瑞威尔期的全球古地理再造

底图据Scotese(2014)

在藏北日土饮水河-兽形湖一带对“奥陶-志留系”剖面进行了深入考察研究, 证实该剖面不存在奥陶纪地层, 最低层位为志留系下部的特列奇阶(陈挺恩和张允白, 2010).

自2017年“第二次青藏高原综合科学考察研究”项目正式启动以来, 作者等人多次前往青藏高原及其周边地区开展地层古生物研究, 在古生物学、地层学、沉积学、古地理学等方面取得一系列新进展(Fang等, 2018a, 2018b, 2019, 2021; Yu等, 2019, 2021; 张元动等, 2019, 2020, 2021a, 2021b; 方翔等, 2020; Zhen等, 2020; 王光旭等, 2021, 2022a, 2022b, 2022c; Chen等, 2023; Li等, 2023; Liang等, 2023; Wang等, 2023; Zhang等, 2023). 本文在系统梳理和总结前人工作的基础上, 结合最新研究成果, 对青藏高原及其周边地区的奥陶纪综合地层、生物群与古地理演化做一个阶段性总结.

2 综合地层框架

中国奥陶纪综合地层框架研究从20世纪60年代到目前为止, 已经历过多次修订和更新(例如: 张文堂, 1962; 赖才根, 1982c; Chen等, 1995; 汪啸风和陈孝红, 2005; 张元动等, 2020), 但是专门针对青藏高原地区的总结研究较少. 本文在综合历史文献的基础上, 选取青藏高原及其周边地区的多条典型剖面(或者区域综合序列), 包括中国境内的31条剖面, 以及南亚和东南亚等周边地区的10条剖面(图2), 对这些地区的年代地层格架、岩石地层划分和生物地层对比等研究进行总结, 建立青藏高原及其周边地区的综合地层框架.

2.1 年代地层标准

自开展全球界线层型剖面和点位(“金钉子”)研究以来, 国际地层委员会奥陶系分会已建立了奥陶系所有7个阶的“金钉子”, 由笔石和牙形刺特定属种定义界线(张元动等, 2021a). 当前通用的奥陶系划分方案为“三统七阶”国际年代地层标准. 此外, 目前《中国地层表》中仍然保留了个别体现中国区域性地层特征的阶名. 因此, 在青藏高原及其周边地区奥陶系研究中, 在使用国际标准的同时, 也兼顾中国标准. 不过, 在难以识别笔石、牙形刺和头足类等标志化石的地区, 需要通过其他门类来建立对比关系(张元动等, 2019).

2.2 地层区划

本文以中国全域的奥陶纪地层区划为基础(张文堂, 1962; 盛莘夫, 1974; 赖才根, 1982c; 汪啸风等, 1996; 张元动等, 2021b), 参考了青藏高原及其周边地区的构造学研究成果(Li等, 2018; Zhao等, 2018; 吴福元等, 2020; Metcalfe, 2021), 形成当前的青藏高原及其周边地区的地层区划方案, 这一方案与李永铁等(2001)对青藏高原的地层分区框架基本一致.

2.3 岩石地层

2.3.1 喜马拉雅地层区

西藏地区具有复杂的地质历史, 不同地层区的地层序列和主要特征存在明显差别. 这是由于在奥陶纪时期西藏地区是由多个位于冈瓦纳大陆东北缘的块体组成, 不过它们相距不远. 其中, 喜马拉雅地层区在大地构造上属于印度板块北部, 与冈底斯-察隅地层区、羌塘-昌都地层区一起构成整个西藏地区主要范围(图2).

喜马拉雅地层区位于整个青藏高原的南缘, 北界为印度河-雅鲁藏布江缝合带. 该地层区的奥陶系在中国境内主要位于普兰-札达-聂拉木-定日-亚东一线, 呈西北-东南条带状分布. 在聂拉木地区, 奥陶系自下而上出露中-上奥陶统甲村群(可进一步划分为阿当组、阿来组和甲曲组)和上奥陶统红山头组(图3, 剖面1; Zhen等, 2020; 方翔等, 2020). 此外, 在定日县内的珠穆朗玛峰峰顶地层为珠穆朗玛峰组灰岩(图3, 剖面2; 图4), 根据其中发现的三叶虫、腕足动物化石(刘第墉, 1976; 尹集祥和郭师曾, 1978; Zhan等, 2014a), 其时代为中奥陶世(方翔等, 2020).

在定日等地, 奥陶系顶部为次仁美组灰岩(此前认为是志留纪早期地层), 与其上覆的志留系扎嘎曲组整合接触(图3, 剖面4; 林宝玉和邱洪荣, 1982). 在普兰-札达一带, 奥陶系自下而上则包括丘共巴组、玛旁雍措组、让布角拉组、幕霞组和松木松组(图3, 剖面3), 其中丘共巴组与下伏寒武系为整合接触, 松木松组与上覆地层关系不明(汪啸风等, 1996).

在日喀则以南的康马地区, 奥陶系则果群为变质砂岩和结晶灰岩, 其与下伏的拉轨岗日岩群石英大理岩不整合接触(图3, 剖面5; 刘文灿等, 2002; 周志广等, 2004). 再向南到亚东地区, 奥陶系下部为绒沙组黄褐

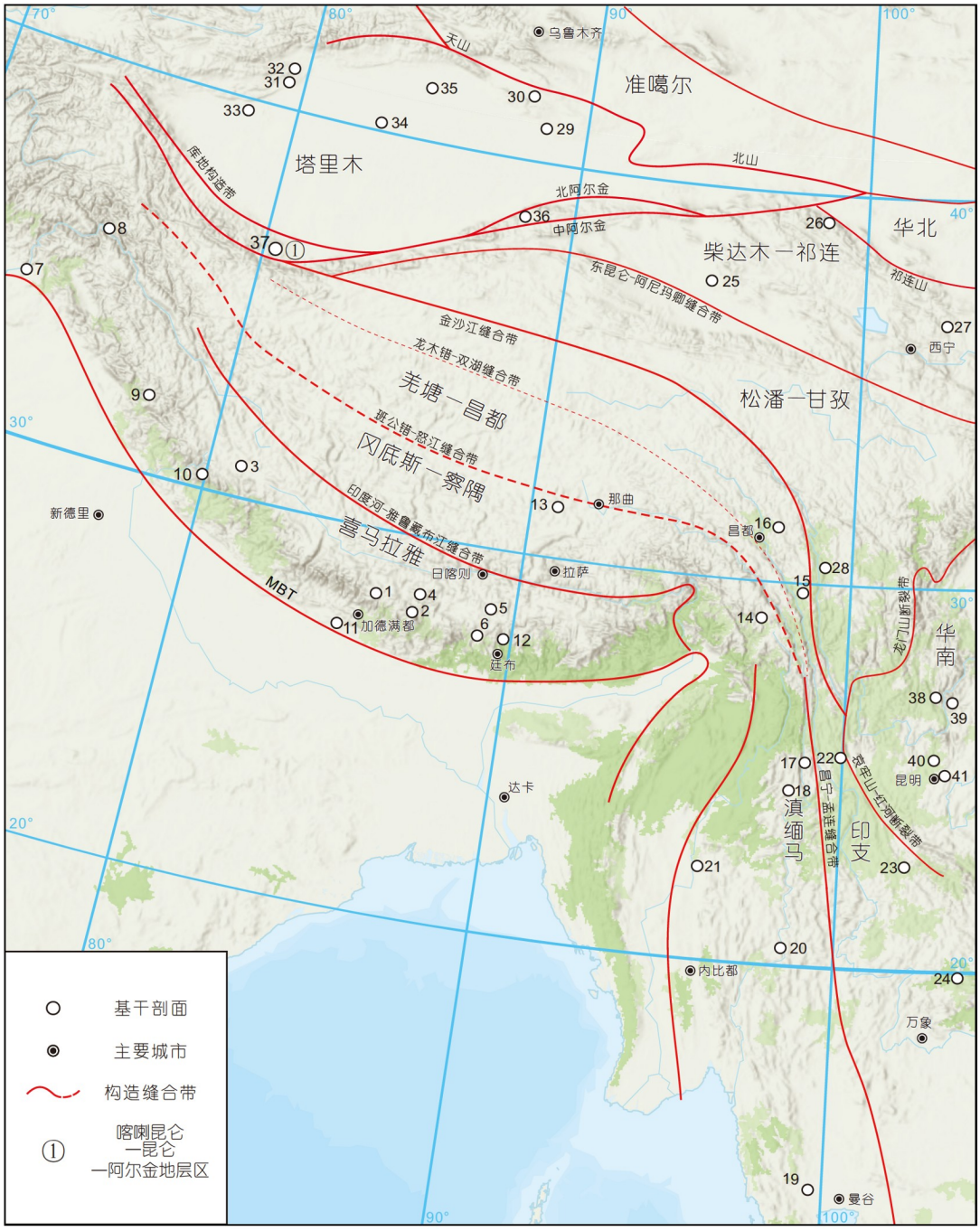


图 2　青藏高原及其周边地区奥陶纪地层区划和出露分布

基干剖面: 1. 中国西藏聂拉木; 2. 中国西藏珠峰; 3. 中国西藏札达; 4. 中国西藏定日; 5. 中国西藏康马; 6. 中国西藏亚东; 7. 巴基斯坦北部Nowshera地区; 8. 克什米尔; 9. 印度Pin地区; 10. 印度Kumaon地区; 11. 尼泊尔Kathmandu地区; 12. 不丹; 13. 中国西藏申扎; 14. 中国西藏察隅; 15. 中国西藏芒康; 16. 中国西藏江达; 17. 中国云南保山; 18. 中国云南芒市; 19. 泰国南部; 20. 缅甸掸邦南部; 21. 缅甸Mandalay地区; 22. 中国云南大理; 23. 中国云南金平; 24. 老挝北部; 25. 中国青海大柴旦; 26. 中国甘肃玉门; 27. 中国甘肃天祝; 28. 中国四川巴塘; 29. 中国新疆库鲁克塔格南区; 30. 中国新疆库鲁克塔格北区; 31. 中国新疆柯坪; 32. 中国新疆乌什; 33. 中国新疆巴楚-大坂塔格; 34. 中国新疆塔中; 35. 中国新疆轮南; 36. 中国新疆若羌环形山; 37. 中国新疆洛克宗山; 38. 中国四川布拖; 39. 中国云南永善; 40. 中国云南巧家; 41. 中国云南昆明. MBT: 主边界断裂

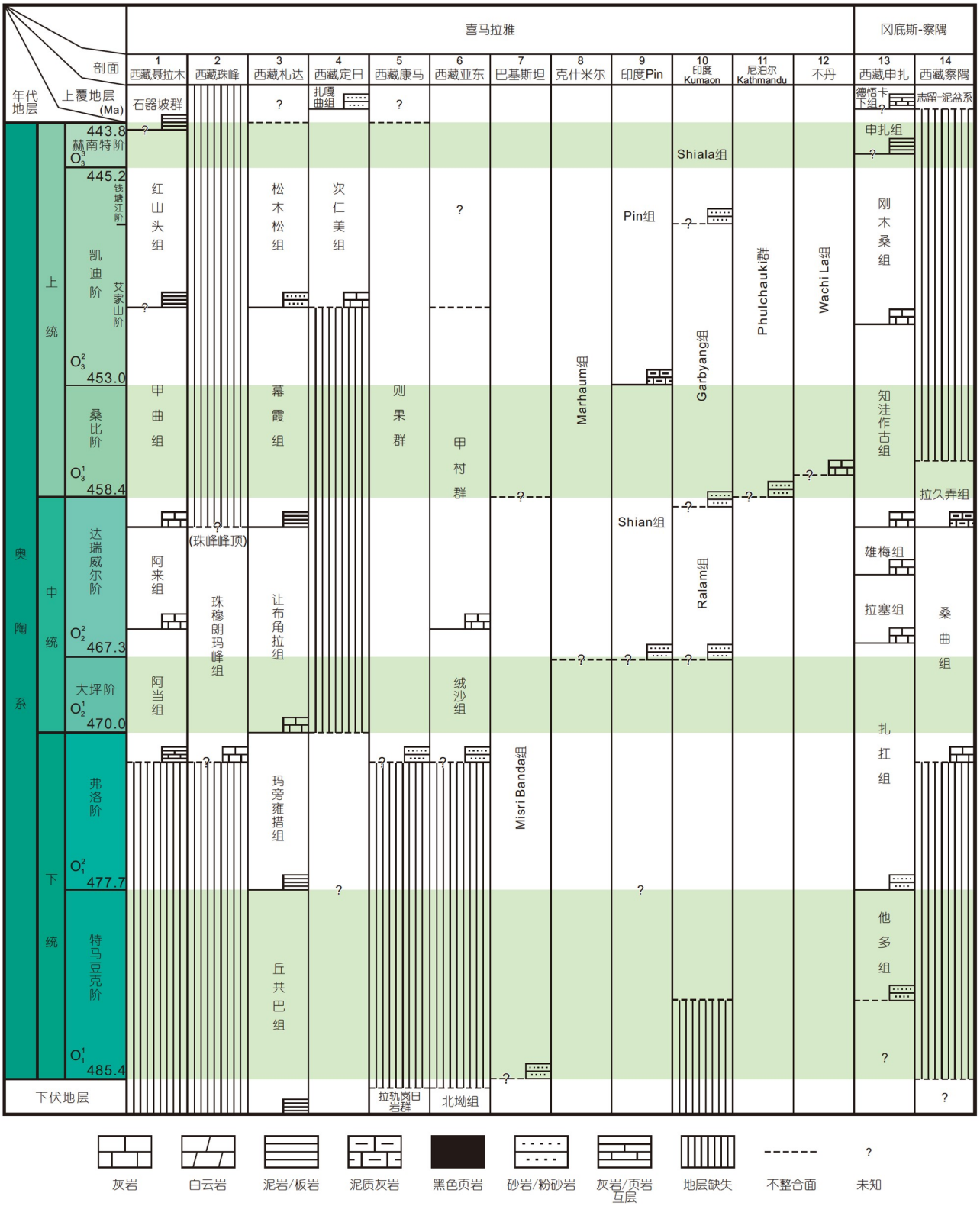


图 3　青藏高原及其周边地区奥陶纪岩石地层对比表之一

数据来源: 剖面1~3和13~14来自张元动等(2021b); 剖面4~6来自方翔等(2020)剖面; 7~12来自Myrow等(2023)



图 4　珠穆朗玛峰奥陶纪地层出露(方翔等, 2020)

(a) 珠穆朗玛峰第一台阶珠穆朗玛峰组地层; (b) 珠穆朗玛峰北坡全景

色石英大理岩, 与上覆的甲村群整合接触, 与下伏的北坳组不整合接触(图3, 剖面6; 尹集祥, 1974; 周志广等, 2004). 上述地区广泛存在寒武-奥陶系之间的不整合关系, 可能是库尔加克运动(或晚泛非运动)所致, 这次构造-热事件对印度板块北缘和拉萨块体的地层序列产生了巨大影响(李才等, 2010a; Myrow等, 2016).

南亚地区的印度和巴基斯坦北部、尼泊尔和不丹也属于喜马拉雅地层区. 该区奥陶系与西藏南部聂拉木的奥陶系相似, 在奥陶系与下伏寒武系基底之间存在一个明显的角度不整合, 由库尔加克运动(或晚泛非运动)所致(Myrow等, 2023). 其中, 巴基斯坦北部Nowshera的奥陶系则以下-中奥陶统的Misri Banda组石英砂岩为代表(图3, 剖面7; Ghobadi Pour和Popov, 2023). 克什米尔地区以中-上奥陶统Marhaum组为代表(图3, 剖面8), Reed(1934)曾报道过该地区Pohru Valley的腕足动物, 确定其时代为奥陶纪. 印度奥陶系出露于北部两个地区(Myrow等, 2023): Pin地区(即Spiti地区)出露中-上奥陶统的Shian组砂岩红层和上奥陶统Pin组海相沉积, 二者不整合下伏于泥盆系(图3, 剖面9); Kumaon地区自下而上分别是硅质碎屑沉积的Ralam组、深水-浅水混合相的Garbyang组和Shiala组(图3, 剖面10). 尼泊尔的奥陶系以上奥陶统的Phulchauki群为主(图3, 剖面11; Gehrels等, 2006). 不丹的奥陶系以上奥陶统的Wachi La组为主(图3, 剖面12; Hughes等, 2006; Myrow等, 2023).

2.3.2　冈底斯-察隅地层区

冈底斯-察隅地层区大致对应拉萨地块, 南界为雅鲁藏布江缝合带, 北界为班公错-怒江缝合带. 该地层区的奥陶系分布于申扎、察隅、班戈等地(图2). 在申扎地区雄梅-永珠-拉塞一带, 奥陶系发育完整, 自下而上包括他多组、扎扛组、柯耳多群(进一步划分为拉塞组、雄梅组和知洼作古组)、刚木桑组和申扎组大部分地层(图3, 剖面13), 其中他多组与下伏的念青唐古拉群不整合接触. 在察隅地区, 奥陶系仅出露中奥陶统桑曲组(包括古玉段、察隅段和白云质灰岩段)和上覆的中-上奥陶统拉久弄组(图3, 剖面14).

2.3.3　羌塘-昌都地层区

羌塘-昌都地层区对应羌塘地块, 南与察隅地块以班公错-怒江缝合带为界, 北与松潘-甘孜地块以拉竹龙-金沙江缝合带(又称西金乌兰-金沙江缝合带)为界. 该地层区的奥陶系呈北北东-南南西条带状出露于金沙江以西的芒康、江达等地, 露头零星, 仅出露中奥陶统"桑曲组"或青泥洞组(图5, 剖面15、16), 其中江达的青泥洞组为一套板岩、石英砂岩和灰岩, 底部含有大坪期的笔石动物群(董得源等, 1979; 张元动等, 2021b). 在藏北尼玛县塔石山附近, 出露下古拉组和塔石山组, 但整个奥陶系的发育详情尚不清楚(李才等, 2010b).

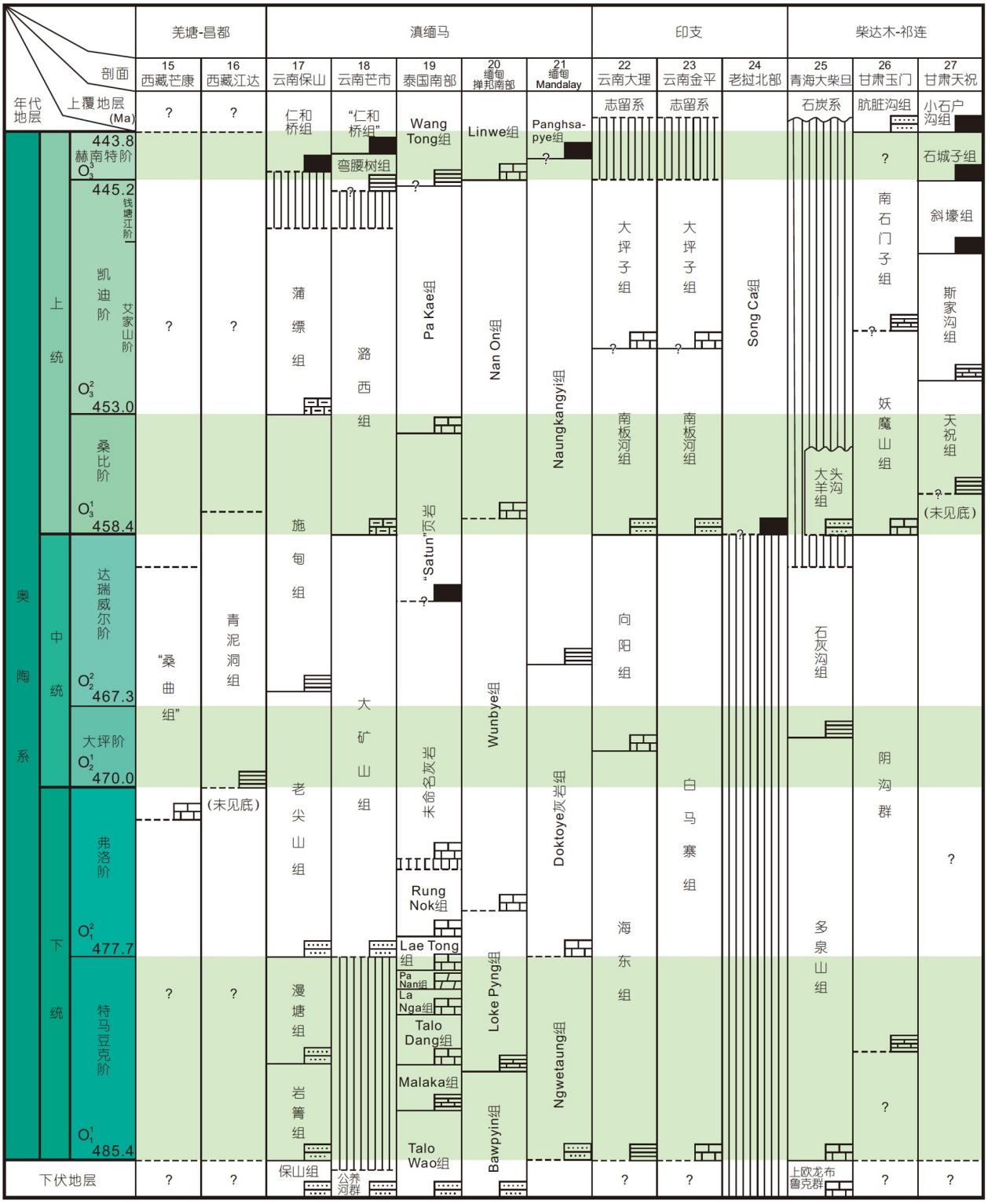


图 5　青藏高原及其周边地区奥陶纪岩石地层对比表之二

数据来源: 剖面15~18、22和25~27来自张元动等(2021b); 剖面19~21来自Wongwanich等(1990)、Burrett等(2017)、Agematsu和Oo(2023); 剖面23来自张远志(1996); 剖面24来自Tran等(2020). 图例参照图3

2.3.4　滇缅马地层区

滇缅马地层区对应滇缅马地体, 该区奥陶系在中国境内主要分布于云南西部的保山、施甸、芒市等地区. 滇缅马地层区东侧以昌宁-孟连缝合带与印支地层区交界, 向西南可以延伸至缅甸、泰国、马来西亚等地(Metcalfe, 2011). 保山、芒市地区的奥陶系与缅甸掸邦东北部、泰国西部Kanchanaburi和南部Satun等地区的奥陶系序列和特征相似(Fortey和Cocks, 1998; Chen等, 2023). 滇西地区的奥陶系在保山出露最为连续、完整, 自下而上依次可以划分为岩箐组、漫塘组、老尖山组、施甸组、蒲缥组和仁和桥组下部(图5, 剖面17), 奥陶系与下伏寒武系保山组整合接触. 芒市地区奥陶系则自下而上包括大矿山组、潞西组、弯腰树组和“仁和桥组”下部(图5, 剖面18; Fang等, 2018a), 大矿山组与下伏公养河群断层接触. 而生物地层研究显示, 在该地区晚奥陶世晚期存在一个广泛分布的不整合面, 缺失部分地层(见5.2节详细介绍; Zhang Y D等, 2014; Fang等, 2018a).

泰国境内大部分地区的奥陶系与中国保山、芒市地区相似, 主要分布于泰国西部和南部地区(Wongwanich等, 1990; Burrett等, 2017). 由于泰国西部植被茂盛, 奥陶系出露较为零星, 在Kanchanaburi地区可见中奥陶统Tha Manao组, 为厚层条带状灰岩, 其上覆地层为上奥陶统Pa Kae组, 为厚层网纹状灰岩, 与华南地区宝塔组、滇西地区蒲缥组岩性类似(Fang等, 2021; Chen等, 2023). 泰国南部的Satun地区的奥陶系广泛出露, 地层总体连续(图5, 剖面19), 自下而上分别包括: 下-中奥陶统的Thung Song群, 岩性以碳酸盐岩为主, 可细分为下奥陶统的Talo Wao组、Malaka组、Talo Dang组、La Nga组、Pa Nan组、Lae Tong组、Rung Nok组; 中奥陶统包括未命名灰岩、“Satun”页岩; 上奥陶统凯迪阶为Pa Kae组, 岩性与泰国西部一致, 但是碳酸盐岩呈红色, 可能是深水成因; 上奥陶统赫南特阶Wong Tong组, 岩性为深灰色粉砂岩(风化呈浅灰色)、黑色炭质页岩和燧石, 可与华南地区的五峰组、观音桥层及滇西的仁和桥组对比(Wongwanich等, 1990; Burrett等, 2017; Fang等, 2018a).

缅甸大部分地区在奥陶纪也属于滇缅马地体, 奥陶系主要出露在掸邦地区, 其中以掸邦南部出露最为连续, 自下而上分别是Bawpyin组(砂岩)、Loke Pyng组、Wunbye组(灰岩)、Nan On组(砂岩夹灰岩)、Linwe组(灰岩)(图5, 剖面20). Mandalay地区则与掸邦地区完全不同, 分别出露Ngwetaung组、Doktoye组(灰岩)、Naungkangyi组和Panghsapye组(图5, 剖面21; Burrett等, 2017).

2.3.5　印支地层区

印支地层区对应印支地体, 东侧以哀牢山-红河缝合带与华南板块为界, 西侧为昌宁-孟连缝合带, 与滇缅马地体分隔. 该地层区的奥陶系主要分布于大理、丽江和金平等地区. 大理海东剖面的奥陶纪地层记录最为完整, 出露最好, 主要由碎屑岩组成, 自下而上包括海东组、向阳组、南板河组和大坪子组(图5, 剖面22; Zhang Y D等, 2014). 在滇南金平地区, 下-中奥陶统则相变为白马寨组, 是一套浅海相的碎屑岩(图5, 剖面23; 云南省地质局第二区域地质测量队, 1975).

在老挝北部, 中奥陶世-志留纪早期地层以深水相细粒沉积为主, 代表深水环境的Song Ca组厚度超过2000m, 分布于老挝北部Song Ca断裂以北(图5, 剖面24; Tran等, 2020).

2.3.6　柴达木-祁连地层区

柴达木地层区分布于东昆仑-阿尼玛卿缝合带以北、西昆仑-祁连山构造带以南, 对应于柴达木、祁连等多个微地体. 该地层区奥陶系主要分布在祁连山、柴达木盆地的大柴旦等地, 以碳酸盐岩(妖魔山组等)和碎屑岩(大头羊沟组、石灰沟组等)为主, 含较丰富的笔石、三叶虫等(图5, 剖面25~27).

2.3.7　松潘-甘孜地层区

松潘-甘孜地层区属褶皱带范畴, 与松潘-甘孜地块对应, 该地块可能是印支运动产生的华南板块被动边缘增生块体(许志琴等, 2012). 该区南部以金沙江缝合带与羌塘-昌都地层区交界, 北部以东昆仑-阿尼玛卿缝合带与柴达木-祁连地层区分界, 东部大致以龙门山断裂带与扬子区分界(图2). 该区的奥陶系详细序列尚不清楚, 在中咱地块等地可见零星出露, 其中在沙鲁里山系南段的木里瓦厂及西秋乡, 出露有巨厚的碎屑岩型下奥陶统瓦厂群; 沿金沙江断裂带的巴塘中咱一带, 出露有碳酸盐岩型的奥陶系邦归组、溜冉卡组和物洛吃普组(图6, 剖面28; 四川省地质局区域地质调查

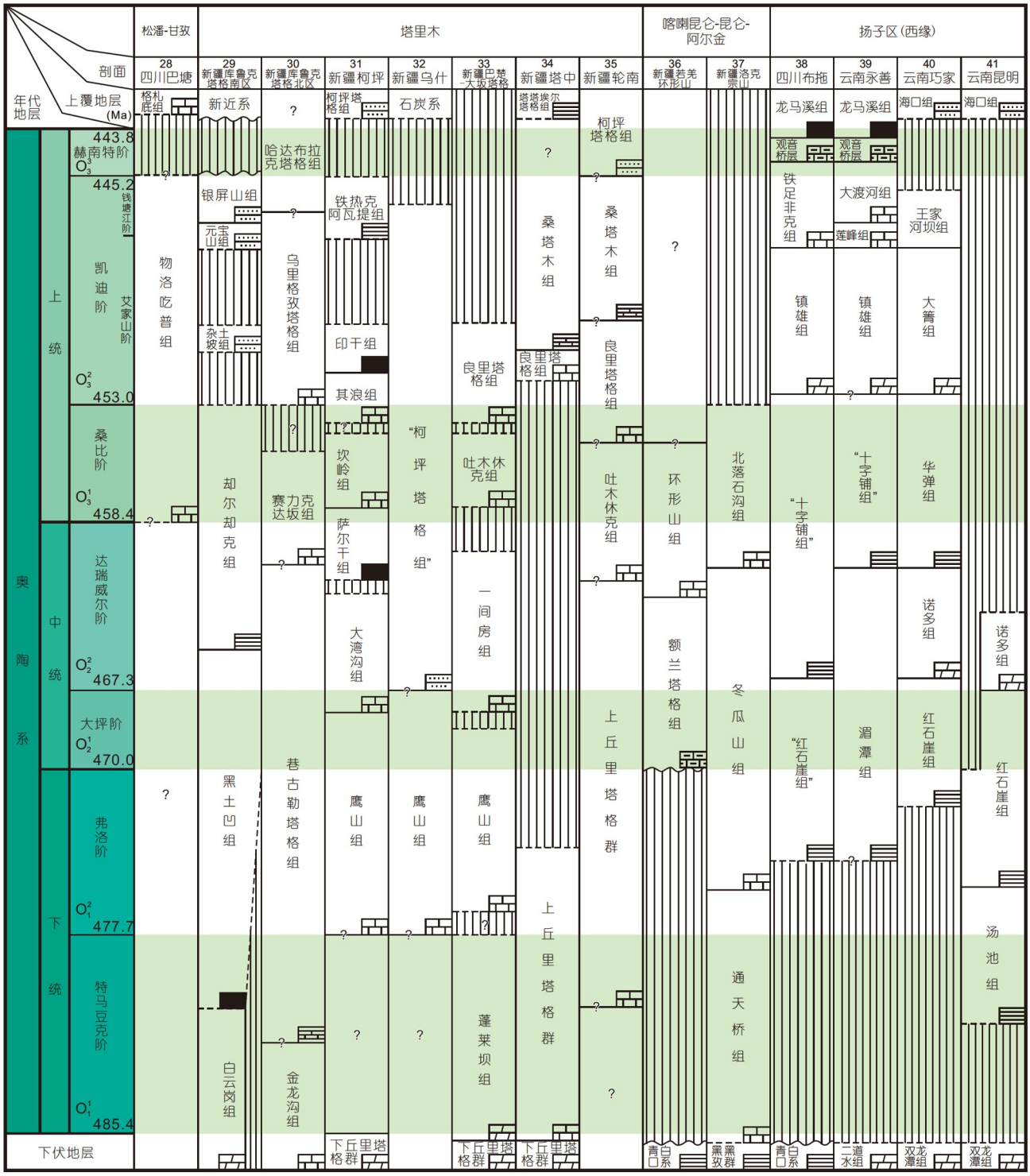


图 6　青藏高原及其周边地区奥陶纪岩石地层对比表之三

数据来源: 剖面28来自四川省地质局区域地质调查队和中国科学院南京地质古生物研究所(1982a); 剖面29~35, 37来自张元动等(2021b); 剖面36来自文世宣等(1998); 剖面38~41来自Wang等(2023). 图例参照图3

队和中国科学院南京地质古生物研究所, 1982a). 在中南部的恰斯、木里等地(属于义敦地体东部)含有一套轻变质的奥陶纪地层, 自下而上包括人公组、瓦厂组和恰斯群第四岩性组, 以片岩、板岩、石英岩和大理岩为特征, 含有微古植物化石*Trachysphaeridium* (粗面球形藻)等; 该套地层下与埃迪卡拉系灯影组、上与二叠系均呈不整合接触(田振东等, 2023). 刘晓佳等(2019)对木里附近的长枪穹隆核部的里伍群黑云母石英片岩进行碎屑锆石测年, 显示时代为早奥陶世.

2.3.8　塔里木-天山地层区

虽然塔里木并不是青藏高原的主要组成区域, 但是作为毗邻地区, 本文对其地层区划也作简要介绍, 以便对比. 塔里木-天山地层区除了包括塔里木地块范围外(塔里木地层分区), 可能还包括中天山和北山的地层(中天山-北山地层分区). 本文着重介绍塔里木地层分区的库鲁克塔格南区和北区、柯坪地区、巴楚地区.

库鲁克塔格南区的奥陶系为相对深水相, 地层序列自下而上包括白云岗组、黑土凹组、却尔却克组、杂土坡组、元宝山组和银屏山组, 为一套砂泥质碎屑岩沉积(图6, 剖面29). 近年来的生物地层研究表明, 黑土凹组底界存在穿时情况(王玉净等, 2008; 陈旭等, 2012); 晚奥陶世凯迪期则存在多期次的地层缺失情况; 银屏山组的笔石和腕足动物化石指示其时代为凯迪晚期(Zhan等, 2014a).

库鲁克塔格北区(即辛格尔地层小区)的奥陶系下部以斜坡型钙质浊积岩为主, 上部则发育了台地边缘相碳酸盐隆起带的厚层块状生物灰岩(钟端和郝永祥, 1990). 整套地层为典型台地浅水相, 以碳酸盐岩为主, 夹有少量泥砂质碎屑岩(图6, 剖面30).

柯坪地区的奥陶系以柯坪大湾沟剖面为代表, 由下而上包括下-中奥陶统鹰山组、大湾沟组, 中-上奥陶统萨尔干组和上奥陶统坎岭组、其浪组、印干组、铁热克阿瓦提组(图6, 剖面31). 在乌什县亚科瑞克, 奥陶系以粗碎屑沉积夹碳酸盐岩为特征, 为一套浅水相地层, 地层序列存在明显间断, 显示了乌什地区相较柯坪地区的沉积环境更加浅水(图6, 剖面32; 景秀春等, 2007; 陈旭等, 2012; Zhang和Munnecke, 2016).

巴楚地区的奥陶系以半闭塞至开阔台地相碳酸盐岩沉积为特征, 发育多期次生物礁. 以巴楚-大坂塔格剖面为代表(图6, 剖面33), 中奥陶世达瑞威尔期和晚奥陶世凯迪早期发育了不同类型的生物礁(Zhang Y Y等, 2014). 塔中地区奥陶系露头较少, 多见于井下, 其序列主要为台地浅水相碳酸盐岩, 存在多个地层间断, 广泛缺失大坪-桑比阶(图6, 剖面34; 刘春晓等, 2009), 晚奥陶世凯迪早期则发育生物礁(Zhang等, 2017). 塔里木盆地西南和南部可能为陆缘地带, 存在不同程度的奥陶纪地层缺失.

2.3.9　喀喇昆仑-昆仑-阿尔金地层区

奥陶系在喀喇昆仑地层分区相对比较发育, 从帕米尔到洛克宗山都有分布, 其中在洛克宗山地区出露最为完整, 总体为稳定浅海碳酸盐岩沉积, 自下而上包括通天桥组、冬瓜山组、北落石沟组(图6, 剖面37; 文世宣等, 1998).

新疆且末地区属于昆仑地层分区, 是阿尔金山和昆仑山之间的过渡地带, 出露下奥陶统库木奇布拉克组、中奥陶统亚普恰萨依组和上奥陶统孔其布拉克组. 在祁漫塔格地区, 奥陶系以铁石达斯群为代表, 上部为碳酸盐岩, 中部为火山岩, 下部为碎屑岩加火山岩. 格尔木以南, 自下而上则出露中哈拉巴依沟组、“滑塌浊积岩组”、石灰厂组和水泥厂组. 在东昆仑东部地区, 奥陶系存在的可能性很大, 但是没有详细研究(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 文世宣等, 1998).

阿尔金地层分区的奥陶系零星分布, 新疆若羌地区的环形山组和下伏的额兰塔格组以浅海相碎屑岩、碳酸盐岩沉积为主, 大致相当于中奥陶统; 可能缺失大部分上奥陶统(图6, 剖面36; 新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993).

2.3.10　扬子地层区(西缘)

扬子区西缘的奥陶系有较为广泛的地层缺失, 时间跨度和范围均不等, 表明曾经存在多个水下隆起, 甚至可能是古陆. 该地区的奥陶系多属浅水相沉积. 川西南布拖、滇东北永善的奥陶系以近岸碎屑岩为主, 出露较为完整连续, 自下而上包括“红石崖组”(湄潭组)、“十字铺组”、镇雄组、铁足非克组(莲峰组、大渡河组)、观音桥层和龙马溪组(底部), 与扬子台地内部序列相似(图6, 剖面38、39).

滇东地区的奥陶系以云南巧家和昆明地区为代

表，奥陶纪地层自下而上包括汤池组、红石崖组、诺多组、华弹组、大箐组、王家河坝组，与上覆的泥盆系海口组平行不整合接触(图6，剖面40、41；张远志，1996)．其中在该地区的红石崖组中，笔石动物指示其时代为弗洛期(张举等，2013)，罗惠麟等(2014)根据其中的三叶虫化石确定其时代为弗洛早期-达瑞威尔早期，Liang等(2020)在巧家地区的红石崖组中识别出大坪晚期-达瑞威尔早期的几丁虫序列．王光旭等(2021, 2022a, 2022b, 2022c)和Wang等(2023)近期对川西南、滇东地区奥陶纪岩石地层进行了重新的梳理和厘定．

2.4 年代地层

2.4.1 下奥陶统

特马豆克阶暨奥陶系底界，目前已确定“金钉子”和2条全球辅助界线层型剖面(“银钉子”)．该界线“金钉子”位于加拿大纽芬兰岛的绿岬剖面(Green Point)，以牙形刺*Iapetognathus fluctivagus*的首现层位(FAD)为标志(Cooper等，2001；张元动等，2019)．2016年，美国犹他州的罗森湾剖面(Lawson Cove)被选为奥陶系底界的“银钉子”，在该剖面上，特马豆克阶底界暨奥陶系底界也以*I. fluctivagus*的FAD为标志(Miller等，2015)．2019年，吉林大阳岔小洋桥剖面也被选为“银钉子”，该界线是以稀土元素异常事件为标志(Wang X F等，2019)．在青藏高原地区，由于库尔加克运动(晚泛非运动)的影响(见5.1节详细介绍)，寒武纪晚期-奥陶纪早期地层普遍缺失，不能准确识别出该界线的标志化石及其他辅助标志．

弗洛阶底界“金钉子”位于瑞典西哥特兰省的Diabasbrottet剖面，该界线以笔石*Tetragraptus approximatus*的首现层位为标志(Bergström等，2004)．同名化石带在西藏申扎地区的扎扛组中可以识别，即在该地区可以准确识别弗洛阶底界(程立人等，2001)．而在西藏不产笔石的灰岩相地层中，则可以牙形刺*Serratognathus diversus*的首现作为辅助标志(Zhen和Nicoll，2009；Zhen等，2009)，或通过其他化石门类的对比来确定大致界线．

2.4.2 中奥陶统

大坪阶底界“金钉子”位于湖北宜昌黄花场剖面，该界线以牙形刺*Baltoniodus triangularis*的首现层位为标志(Wang等，2009)．同名牙形刺带在扬子台地上广泛分布(Wang Z H等，2019)，但是在青藏高原地区难以识别．

达瑞威尔阶底界“金钉子”于1997年确立于浙江常山黄泥塘剖面，该界线以笔石*Levisograptus austrodentatus*的首现层位为标志(Mitchell等，1997；陈旭等，1998；张元动等，2008)．达瑞威尔阶底界在青藏高原周边部分地区可以识别，同名笔石带在滇西保山地区的老尖山组顶部的粉砂岩和粉砂质页岩(Zhang Y D等，2014)、青海柴达木地区的石灰沟组均可以识别(青海省地质矿产局，1991)．在新疆库鲁克塔格地区，*L. austrodentatus*带位于黑土凹组顶部，比放射虫*Tetrasphaera kuruktagensis*带略高(王玉净等，2008；陈旭等，2012)．

2.4.3 上奥陶统

桑比阶底界“金钉子”位于瑞典斯科讷省的Fågelsång剖面，以笔石*Nemagraptus gracilis*的首现层位为标志(Bergström等，2000)．在确立该“金钉子”的同时，中国新疆大湾沟剖面和美国亚拉巴马州的Calera剖面均被确定为上奥陶统底界(桑比阶底界)的“银钉子”剖面(Bergström等，2000)．由于历史传统等原因，中国常用艾家山阶(原艾家山统)囊括桑比阶和凯迪阶下部地层(钱塘江阶之下；Lee和Chao，1924)．艾家山阶底界与桑比阶底界一致(张元动等，2019)．在华南的庙坡组、胡乐组，塔里木的萨尔干组等地层可以识别*Nemagraptus gracilis*带，其底界指示桑比阶底界(Chen等，2017)．另外，在滇西保山地区的施甸组中则可以识别出*Climacograptus peltifer*带，其底界可以大致指示桑比阶底界(Zhang Y D等，2014)．

凯迪阶底界“金钉子”位于美国俄克拉何马州的Black Knob Ridge剖面，该界线以笔石*Diplacanthograptus caudatus*的首现层位为标志(Goldman等，2007)．同名笔石带见于中国华北鄂尔多斯西南部的陇县地区龙门洞组、新疆柯坪大湾沟剖面印干组(Chen等，2017)．在华南上奥陶统年代地层划分中，还保留使用钱塘江阶，其底界以*Dicellograptus complanatus*笔石带的底界为标志，大体与广泛分布的五峰组底界相当(张元动等，2020)．凯迪期地层在青藏高原地区多为灰岩，不过牙形刺生物带划分仍较粗略，目前未能准确识别凯迪阶底界．

赫南特阶底界的“金钉子”位于湖北宜昌王家湾北

剖面, 界线以笔石*Metabolograptus extraordinarius*的首现层位为标志(Chen等, 2006). 该阶底界在青藏高原及周边地区可以识别, 位于西藏申扎的申扎组(倪寓南等, 1981)、滇西芒市弯腰树组(Fang等, 2018a)、保山仁和桥组(倪寓南等, 1983; Fang等, 2018a)等地层底部.

2.5　生物地层

青藏高原地区奥陶纪岩石地层以灰岩为主, 夹少量碎屑岩. 生物地层序列以笔石、牙形刺和头足类较为完整、连续, 可与其周边地区和世界其他部分地区进行对比.

2.5.1　笔石

青藏高原地区奥陶纪笔石序列并不完整, 可以识别的笔石带主要集中在下奥陶统上部-中奥陶统, 以及上奥陶统顶部, 本文介绍的综合笔石序列由青藏高原和周边地区的资料综合而成(图7).

(i) 弗洛阶

(a) *Tetragraptus approximatus*带. 该带以带化石的首次出现为底界标志, 也是下奥陶统弗洛阶的底界标志(Bergström等, 2004). 在西藏申扎地区的扎扛组中可以识别该带(图8b; 张以春等, 2004). 在扎扛组中, 除了丰富的带化石外, 还含有*Tetragraptus scandens*、*T. quadribrachiatus*、*T. decipiens*、*T. pendens*、*T. bigsbyi*等.

(b) *Baltograptus deflexus*带. 该带以带化石的首次出现为底界标志, 在西藏申扎地区扎扛组中可以识别(张以春等, 2004). 除了丰富的带化石外, 该带还含有*Expansograptus opimus*、*E. ensjoensis*、*Acrograptus nicholsoni*、*Corymbograptus v-fractus*、*Didymograptellus bifidus*等. 该化石带时代为弗洛晚期(张元动等, 2020).

(ii) 大坪阶

*Expansograptus hirundo*带. 该带以*E. hirundo*的首次出现为底界标志, 见于西藏江达县青泥洞剖面(董得源等, 1979). 该化石带位于青泥洞组下部的板岩中, 同层位中还有*Expansograptus extensus*、*Tetragraptus amii*等. 该化石带时代为大坪早期.

(iii) 达瑞威尔阶

(a) *Levisograptus austrodentatus*带. 该带以*L. austrodentatus*的首次出现为标志, 也是中奥陶统达瑞威尔阶底界的标志(陈旭等, 1997). 该带在研究区内的云南保山地区的老尖山组和柴达木盆地的石灰沟组底部可以识别, 顶界以*Didymograptus artus*的出现为标志, 带内还含有*Pseudoclimacograptus*? sp.、*Callograptus* sp.、*Didymograptus* sp.等笔石(Zhang Y D等, 2014).

(b) *Didymograptus artus*带. 该带以*D. artus*的首次出现为底界标志, 在云南保山地区的施甸组中可以识别. 带内还含有*Haddingograptus oliveri*、*Proclimacograptus angustatus*、*Hustedograptus teretiusculus*等笔石(Zhang Y D等, 2014). 该笔石带主要分布在施甸组的中上部(图8f), 由于施甸组下部为砂岩和钙质砂岩, 未见笔石, 所以*D. artus*带底界的准确位置仍不确定. 该化石带时代为达瑞威尔早期.

(c) *Didymograptus murchisoni*带. 该带以*D. murchisoni*的首次出现为底界标志, 在塔里木盆地和滇西保山地区都可以识别. 在塔里木西北的萨尔干组中还含有*Archiclimacograptus arctus*、*Pseudamplexograptus distichus*、*Acrograptus saerganensis*、*Glossograptus acanthus*、*Abrograptus formosus*等(Chen等, 2017). 在滇西保山地区施甸组中还含有*Hustedograptus teretiusculus*、*H. vikarbyensis*、*Archiclimacograptus riddellensis*、*Archicl. angulatus*、*Levisograptus dentatus*等(图8g; Zhang Y D等, 2009a, 2009b, 2014). 该化石带时代为达瑞威尔晚期.

(d) *Jiangxigraptus vagus*带. 该笔石带以*J. vagus*的首次出现为底界标志, 见于塔里木西北地区萨尔干组近顶部. 带中含有较丰富的早期双头笔石类和叉笔石类, 以及双笔石类*Hustedograptus*、*Archiclimacograptus*、*Haddingograptus*、*Unicornigraptus*等(Chen等, 2017; 张元动等, 2020).

(iv) 桑比阶

(a) *Nemagraptus gracilis*带. 该带以*Nemagraptus gracilis*的首次出现为标志, 也是上奥陶统桑比阶底界的标志(Bergström等, 2000). 青藏高原未见该带, 但在塔里木地区的萨尔干组可以识别该化石带. 除带化石之外, 新疆大湾沟剖面*N. gracilis*带下部还包括*Jiangxigraptus exilis*、*J. salopiensis*、*J.* cf. *bispiralis*、*Nemagraptus delicatus*、*Normalograptus* sp.和*Unicornigraptus minimus*, 与瑞典Fågelsång“金钉子”剖面同名笔石带的内容相似(Chen等, 2017).

(b) *Climacograptus bicornis*带. 该带以*C. bicornis*

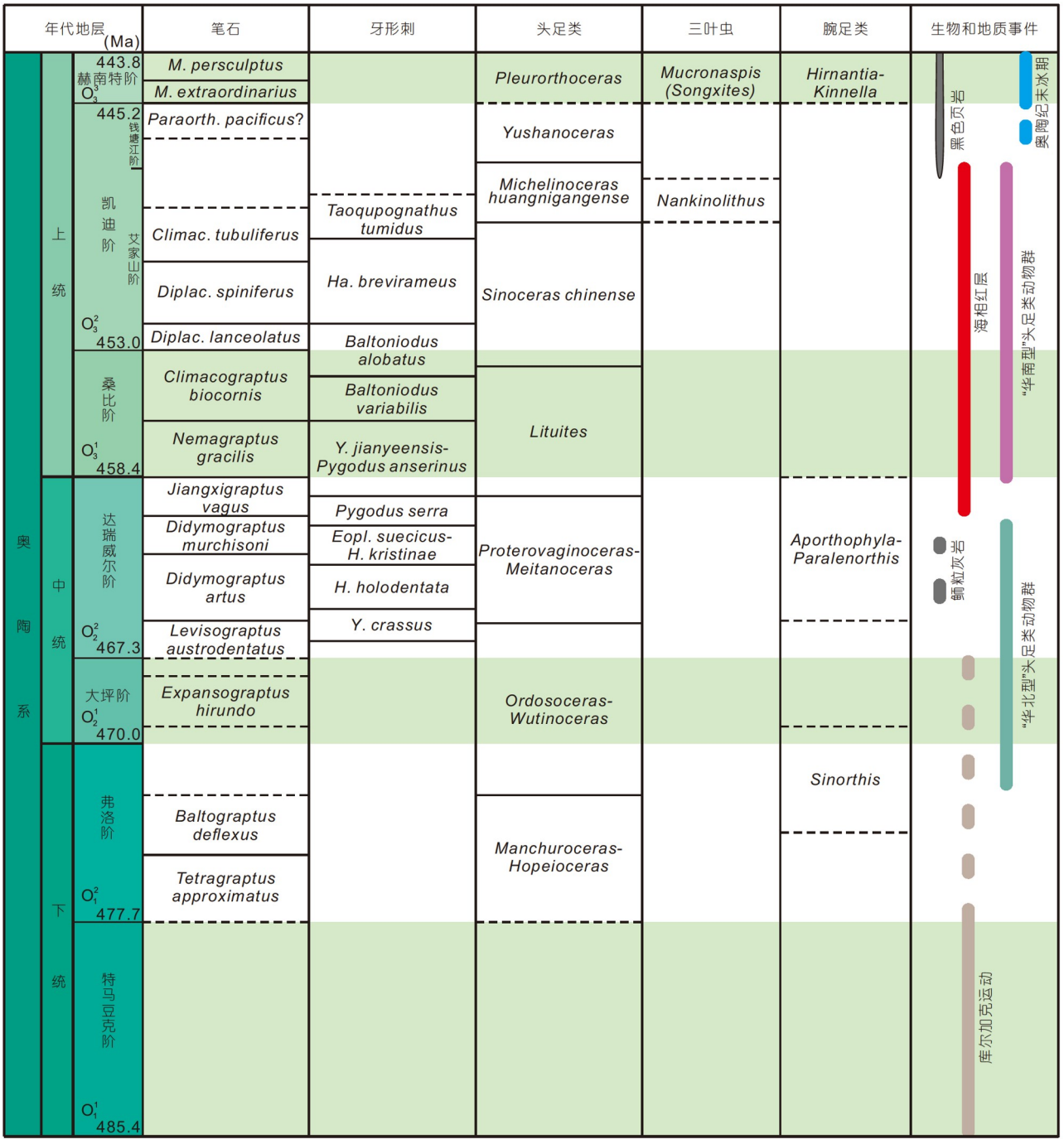


图 7　青藏高原及其周边地区奥陶纪生物地层对比表及生物和地质事件

生物和地质事件数据来源: Fang等, 2018a, 2019; Yu等, 2019; 张元动等, 2019

的首次出现为底界标志. 见于塔里木柯坪地区, 位于其浪组中(Chen等, 2000). 该化石带时代为桑比晚期.

(v) 凯迪阶

(a) *Diplacanthograptus lanceolatus*带. 该带以*D. lanceolatus*的首次出现为标志, 见于研究区内的塔里木地区其浪组上部和印干组(Chen等, 2000). 其时代与*Diplacanthograptus caudatus*带相当, 后者底界也是凯迪阶的底界. 该化石带时代为凯迪早期.

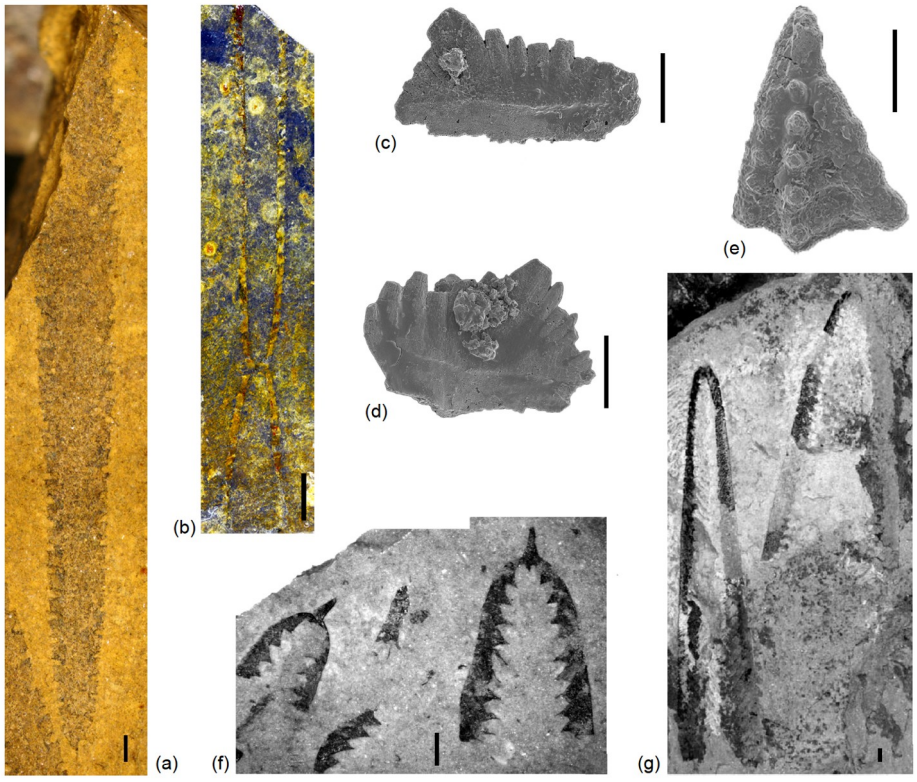


图 8　青藏高原地区奥陶纪典型带化石

(a) *Metabolograptus* cf. *extraordinarius*, NIGP67856, 产自西藏申扎地区申扎组(Mu和Ni, 1983); (b) *Tetragraptus approximatus*, NIGP171259, 产自西藏申扎地区扎扛组(Zhen等, 2020); (c)、(d) *Histiodella holodentata*, (c) NIGP171232, (d) NIGP171233, 产自西藏聂拉木阿来组(Zhen等, 2020); (e) *Pygodus serra*, NIGP171241, 产自西藏聂拉木甲曲组(Zhen等, 2020); (f) *Didymograptus artus*, NIGP149245, 产自云南保山施甸组(Zhang等, 2009a); (g) *Didymograptus murchisoni*, NIGP149253, 产自云南保山施甸组(Zhang等, 2009a). 比例尺: (b)为1cm, (c)~(e)为0.1mm, 其他为1mm

(b) *Diplacanthograptus spiniferus*带. *Diplacanthograptus spiniferus*带以带化石的首次出现为底界标志, 见于塔里木盆地印干组中, 同层位的笔石分子还包括*Amplexograptus praetypicalis*、*Rectograptus amplexicaulis*、*Orthograptus quadrimucronatus*等(Chen等, 2000). 该时期地层在中国华北大部分地区缺失, 在扬子台地和江南斜坡带为一套碳酸盐岩(宝塔组、砚瓦山组), 缺少笔石, 但在珠江盆地区可以识别(陈旭等, 2010; 张元动等, 2020). 该化石带的时代为凯迪早期.

(c) *Climacograptus tubuliferus*带. *Climacograptus tubuliferus*带以带化石首次出现为底界标志, 为北美常见化石带(Goldman等, 2007). 该带见于滇西保山地区蒲缥组上部的平掌层黑色页岩. 除带化石以外, 带内还包括*Reteograptus grandis*、*Climacograptus styloides*、*Diplograptus crassitestus*等(Zhang Y D等, 2014), 时代为凯迪中期. 该带在中国其他地区无法识别.

(d) *Paraorthograptus pacificus*带? 该笔石带见于滇西芒市的弯腰树组底部, 但由于弯腰树组与下伏地层潞西组之间存在地层缺失, 故*P. pacificus*带底界不明(Fang等, 2018a). 带中仅含有*Dicellograptus*? aff. *graciliramosus*和*Diplograptus maximus*等笔石, 时代为凯迪晚期(Zhang Y D等, 2014).

(vi) 赫南特阶

(a) *Metabolograptus extraordinarius*带. 该带以带化石的首次出现为底界标志, 代表赫南特阶底界. 该笔石带广泛见于研究区内的中国西藏申扎(Mu和Ni, 1983; Zhen等, 2020), 中国云南保山、芒市(Fang等, 2018a)、永善(唐鹏等, 2017; Chen等, 2022), 泰国南部(Wongwanich等, 1990), 缅甸掸邦西部(Chen等, 2020)等地, 时代为赫南特早期(图8a).

(b) *Metabolograptus persculptus*带. 该带以带化石的首次出现为底界标志, 其顶界由笔石*Akidograptus ascensus*的首次出现(即志留系底界)来界定, 可以在中国西藏申扎(Mu和Ni, 1983; Zhen等, 2020), 云南保山、芒市、永善(Fang等, 2018a; 唐鹏等, 2017), 四川汉源(Chen等, 2022), 以及泰国南部(Wongwanich等, 1990)、缅甸掸邦西部(Chen等, 2020)等地识别, 时代为赫南特晚期.

2.5.2 牙形刺

(i) 中奥陶统

(a) *Yangtzeplacognathus crassus*带. 此带以*Yangtzeplacognathus crassus*首现为底界标志, 见于塔里木地区达瑞威尔阶大湾沟组, 可以进行国际对比. 除带化石外, 其余共生分子还有*Lenodus variabilis*、*Baltoniodus norrlandicus*、*B. medius*、*B. prevariabilis*、*Protopanderodus calceatus*等(Zhen等, 2011). 该化石带时代为达瑞威尔早期(图7).

(b) *Histiodella holodentata*带. 此带以*Histiodella holodentata*首现为底界标志. 该带见于新疆塔里木地区大湾沟组顶部(Zhen等, 2011)和西藏聂拉木地区阿来组下部(图8c, 8d; 方翔等, 2020; Zhen等, 2020). 此外, *Histiodella holodentata*作为一个全球广布化石种, 在东南亚泰国等地区也有记录(Agematsu等, 2006, 2008). 该化石带时代为达瑞威尔中期.

(c) *Eoplacognathus suecicus-Histiodella kristinae*带. 此带以*Eoplacognathus suecicus*或*Histiodella kristinae*的首现为底界标志, 见于塔里木西北地区的大湾沟组顶部(Zhen等, 2011)和西藏聂拉木地区阿来组中部(方翔等, 2020; Zhen等, 2020). 共生分子还有*Baltoniodus prevariabilis*、*Ansella jemtlandica*、*Paroistodus horridus*等. 该化石带时代为达瑞威尔中期.

(d) *Pygodus serra*带. 此带见于塔里木西北地区萨尔干组中下部(Zhen等, 2011)、西藏聂拉木地区阿来组上部和察隅地区桑曲组顶部(图8e; 方翔等, 2020; Zhen等, 2020). 其底界以*Pygodus serra*的首现为标志, 带内共生分子还有*Yangtzeplacognathus foliaceus*、*Y. protoramosus*、*Baltoplacognathus reclinatus*、*B. robustus*、*Baltoniodus prevariabilis*等. 该化石带时代为达瑞威尔晚期.

(e) *Yangtzeplacognathus jianyeensis-Pygodus anserinus*带. 此带以*Yangtzeplacognathus jianyeensis*或*Pygodus anserinus*的首现为底界标志, 见于塔里木萨尔干组顶部、坎岭组和吐木休克组(Zhen等, 2011; 张元动等, 2020)、云南大理地区南板河组(董致中和王伟, 2006; Zhang Y D等, 2014)、西藏聂拉木地区甲曲组中部、申扎地区知洼作古组下部(方翔等, 2020; Zhen等, 2020)和泰国南部Satun地区Pa Kae组下部(Agematsu等, 2007). 该化石带内牙形刺分子还有*Ansella jemtlandica*、*Baltoniodus prevariabilis*、*Dapsilodus mutatus*、*Pygodus serra*、*Y. protoramosus*等, 时代为达瑞威尔晚期-桑比早期(张元动等, 2020). 桑比阶底界是以笔石*Nemagraptus gracilis*的首现为标志, 但在缺失笔石的地区, 特别是碳酸盐岩相区, 可用牙形刺*Pygodus serra*的消失层位(Last Appearance Datum)大致作为桑比阶之底(Zhen等, 2011; 张元动等, 2020).

(ii) 上奥陶统

(a) *Baltoniodus variabilis*带. 该带以带化石首现为底界标志, 见于中国塔里木地区的坎岭组(王志浩和周天荣, 1998)和泰国南部Pa Kae组(Agematsu等, 2007). 该化石带中还含有*Protopanderodus liripipus*和*Scabbardella altipes*等. 在西藏聂拉木地区的甲曲组, 可以识别*Amorphognathus tvaerensis*带(Zhen等, 2020; 方翔等, 2020), 其下部可与*Baltoniodus variabilis*带对比.

(b) *Baltoniodus alobatus*带. 该带以*Baltoniodus alobatus*首现为底界标志, 见于塔里木地区的坎岭组和吐木休克组(Zhen等, 2011). 带内还含有*Baltoniodus variabilis*、*Protopanderodus liripipus*和*Scabbardella altipes*等, 时代为桑比晚期-凯迪初期. 该带大致相当于聂拉木甲曲组*Amorphognathus tvaerensis*带的中部(Zhen等, 2020).

(c) *Hamarodus brevirameus*带. 此带以*Hamarodus brevirameus*的首现为底界标志. 见于西藏聂拉木地区甲曲组顶部、申扎地区知洼作古组上部(方翔等, 2020; Zhen等, 2020)、泰国南部Satun地区的Pa Kae组上部(Agematsu等, 2007). 带中还含有从下伏地层上延而来的*Periodon grandis*和*Scabbardella altipes*等属种(Wang Z H等, 2019). 该化石带时代为凯迪早期.

(d) *Taoqupognathus tumidus*带. 此带以*Taoqupognathus tumidus*的首现为底界标志. 带内其他特征分子有*Yaoxianognathus neimengguensis*、*Y. yaoxianensis*等. 该带见于塔里木巴楚-塔中地区的良里塔格组顶部和

上覆的桑塔木组，及柯坪地区的柯坪塔格组(赵治信等, 2000; 景秀春等, 2007; 王志浩等, 2017). 该化石带时代为凯迪中期, 可与华南*Protopanderodus insculptus*带及澳大利亚的*Taoqupognathus tumidus-Protopanderodus insculptus*带对比.

2.5.3　头足类

青藏高原地区的奥陶系富含灰岩，出露广泛、厚度巨大，灰岩中所含的丰富头足类是该地区地层划分对比的主要化石门类，尤其是在无法建立牙形刺带的地层中，具有重要的地层划分对比意义. 研究区内主要可以建立以下8个头足类化石带(图7).

(i) 下奥陶统

*Manchuroceras-Hopeioceras*带. 该带以带化石*Manchuroceras*和*Hopeioceras*的大量出现为标志, 常见*Coreanoceras*共生，是华南红花园组和华北亮甲山组的常见化石带. 该带见于研究区内的中国西藏聂拉木地区阿当组(陈均远, 1975; 方翔等, 2020)、青海柴达木多泉山组(张日东, 1965), 泰国南部地区(Stait和Burrett, 1984). 该化石带的时代为弗洛期.

(ii) 中奥陶统

(a) *Ordosoceras-Wutinoceras*带. 该带以带化石*Ordosoceras*和*Wutinoceras*的大量出现为标志. 见于研究区内的中国新疆阿尔金山地区(赖才根和王明倩, 1986)、公格尔山地区(陈均远和王明倩, 1983)、西藏聂拉木地区阿来组(陈挺恩, 1984)、申扎地区拉塞组(陈挺恩, 1987; Fang等, 2018b)、泰国南部地区(Stait和Burrett, 1984), 以及缅甸西部的Wunbye组(Niko和Sone, 2014). 在西藏阿里札达地区的让布角拉组也有该化石带的分子(聂泽同, 1990). 该化石带的时代为大坪期-达瑞威尔期.

(b) *Proterovaginoceras-Meitanoceras*带. 该带以带化石*Proterovaginoceras*和*Meitanoceras*的大量出现为标志. 见于研究区内的新疆塔里木大湾沟组(周志毅, 2001)、西藏聂拉木阿来组(陈均远, 1975; 陈挺恩, 1984; 方翔等, 2020)、申扎地区雄梅组(陈挺恩, 1987)、东喀喇昆仑地区冬瓜山组(刘世坤等, 1986)、西昆仑地区(赖才根, 1982c). 该化石带的时代为达瑞威尔期.

(iii) 上奥陶统

(a) *Lituites*带. 该带以带化石*Lituites*的大量出现为标志，是华南扬子区大田坝组或庙坡组的常见化石带. 该带见于滇西保山蒲缥组下部(陈挺恩, 1983a)、塔里木坎岭组(王明倩, 1981)、西藏聂拉木阿来组(陈均远, 1975; 陈挺恩, 1984)、申扎雄梅组(陈挺恩, 1987)、喀喇昆仑地区(刘世坤等, 1986). 该化石带是扬子区达瑞威尔晚期到桑比期的标准化石带，共生头足类分子还有*Cyclolituites*和*Rhynchorthoceras*等(方翔等, 2015, 2017).

(b) *Sinoceras chinense*带. 该带以带化石*Sinoceras chinense*的大量出现为标志, 是华南地区宝塔组的常见化石带. 在中国西藏及周边地区见于滇西保山的蒲缥组(陈挺恩, 1983a)、塔里木柯坪地区的其浪组(王明倩, 1981)、西藏聂拉木的甲曲组(陈均远, 1975; 陈挺恩, 1984)、申扎的知洼作古组-刚木桑组(赖才根, 1982a, 1982b; 陈挺恩, 1987)、尼玛县的塔石山组(李才等, 2010b), 以及泰国西部和南部地区的Pa Kae组(Fang等, 2021; Chen等, 2023). 该化石带时代为桑比晚期-凯迪早期.

(c) *Michelinoceras huangnigangense*带. 该带以带化石*Michelinoceras huangnigangense*的出现为底界标志，见于滇西保山蒲缥组(陈挺恩, 1983a)、西藏申扎刚木桑组(陈挺恩, 1987)、尼玛县塔石山组(李才等, 2010b). 该化石带的时代为凯迪中期.

(d) *Yushanoceras*带. 该带以带化石*Yushanoceras*的出现为底界标志，在青藏高原及周边地区仅见于西藏申扎地区的刚木桑组(陈挺恩, 1987). 同期保存的分子还有*Xiazhenoceras*等. *Yushanoceras*是浙赣地区上奥陶统三衢山组、下镇组的标志化石(卢衍豪等, 1976). 该化石带时代为凯迪中期.

(e) *Pleurorthoceras*带. 该带以带化石*Pleurorthoceras*的出现为底界标志，见于西藏申扎地区的刚木桑组上部(陈挺恩, 1987). *Pleurorthoceras*通常保存在华南地区五峰组黑色页岩中, 与笔石*Metabolograptus ojsuensis* (=*Diplograptus bohemicus*)共生(邹西平, 1985), 时代为赫南特早期.

3　动物群特征和生物事件

青藏高原地区奥陶纪动物群以笔石、牙形刺、头足类为主. 除此之外, 也有少量三叶虫、腕足动物、腹足类、珊瑚、几丁虫和放射虫等化石记录. 其中部分动物群具有重要的地层学和古生态学意义.

3.1 三叶虫

青藏高原地区的奥陶纪三叶虫化石较少，仅有晚奥陶世凯迪中期的*Nankinolithus*动物群和赫南特期的*Mucronaspis* (*Songxites*)动物群，可与其他地区建立地层对比联系(图7). 其中*Nankinolithus*动物群是与笔石*Dicellograptus elegans*带及*Dicellograptus complanatus*带相对应并等时分布的三叶虫动物群. 该动物群组成分子还包括*Amphitryon zhejiangensis*、*Cyclopyge rotundata*、*Ovalocephalus decorosus*等. 动物群标志化石和相关三叶虫见于滇西保山蒲缥组(Fang等, 2018a)、新疆库鲁克塔格地区的银屏山组(彭善池等, 2009). 该动物群时代为凯迪中期.

Mucronaspis (*Songxites*)动物群在青藏高原及周边地区见于中国滇西芒市弯腰树组(Fang等, 2018a)、甘肃祁连石城子组(曲新国, 1986)，以及泰国南部Wong Tong组(Cocks等, 2005)等，组成分子还有*Niuchangella*、*Eoleonaspis*、*Platycoryphe*和*Dicranopeltis postulosus*等. 该动物群全球广布，时代为赫南特期，对应于笔石*Metabolograptus extraordinarius*带到*Metabolograptus persculptus*带.

3.2 腕足动物

青藏高原及周边地区的奥陶系含有少量代表性的腕足动物群，具有一定的地层对比意义(图7).

*Sinorthis*动物群是一个极具华南地方特色的腕足动物群，时代为早奥陶世晚期-中奥陶世早期. 除命名属*Sinorthis*外，其他常见腕足动物组分包括*Xinanorthis*、*Desmorthis*、*Euorthisina*、*Leptella*、*Yangtzeella*等. 该动物群见于中国新疆和田的冬瓜山组(许汉奎和孙东力, 1998)、缅甸掸邦地区Wunbye组(Zhan等, 2014c).

*Aporthophyla-Paralenorthis*动物群是在欧洲和北美地区广泛发育的*Aporthophyla*动物群的典型代表之一，在西藏聂拉木地区的中奥陶统阿来组中产出，尽管该动物群在冈瓦纳和劳伦大陆上广布，但是仅限于特定纬度(图9a, 9b; Zhan等, 2014a). 该动物群与扬子区的*Saucrorthis*动物群可以对比，后者广泛分布于扬子区，时代为中奥陶世达瑞威尔期. *Saucrorthis*动物群最主要的特征就是大量发育*Saucrorthis*，同时伴有一些其他常见分子，如*Parisorthis*、*Orthambonites*、*Nothorthis*、*Dolerorthis*、*Protoskenidioides*等. *Saucrorthis*动物群也见于研究区内的滇西保山施甸组(Zhan等, 2014b)、哈萨克斯坦南部和伊朗北部地区(Zhan等, 2014c).

*Hirnantia*动物群是晚奥陶世赫南特期标志性的腕足动物群，全球广布. 典型组分包括*Dalmanella*、*Oniella*、*Hirnantia*、*Kinnella*、*Hindella*等. 该动物群与三叶虫*Mucronaspis* (*Songxites*)动物群时代相近，经常共生. *Hirnantia*动物群是一个在全球广泛分布、延续时间较短的腕足动物群(Rong等, 2020a)，在青藏高原及周边地区见于中国西藏申扎地区申扎组(倪寓南等, 1981)、滇西芒市地区弯腰树组(Fang等, 2018a; Huang等, 2020)、祁连山的石城子组(曲新国, 1986)，以及泰国南部的Wong Tong组(Cocks和Fortey, 1997; Cocks等, 2005)、缅甸曼德勒地区Naungkangyi组(Rong等, 2020b)和掸邦北部地区Panghsapye组(Cocks和Fortey, 2002).

3.3 腹足类

青藏高原地区的奥陶纪腹足类属种不多，但比较常见. 西藏聂拉木地区阿来组和札达地区下拉孜下组中产出中奥陶世的*Maclurites*-“*Hormotoma*”组合，即典型的马氏螺群落组合，指示水能较高的BA2-BA3水体环境(余汶, 1975; Li等, 2023). 喀喇昆仑地区有少量中奥陶世腹足类记录，包括*Ecculiomphalus*、*Lesueurilla*、*Pararaphistoma*(余汶等, 1963). 阿尔金山若羌地区中奥陶统产出*Maclurites*、*Pararaphistoma*、*Liospira*、*Clathrospira*、*Lophospira*、*Holopea*(余汶和宁荟, 1983). 在甘肃酒泉、玉门阴沟群中曾记录有大坪期-达瑞威尔期的*Calaurops*、*Donaldiella*、*Ecculiomphalus*、*Lesueurilla*、*Poleumita*等(余汶等, 1963). 新疆巴楚地区吐木休克组(桑比期)产有*Bucania*、*Maclurites*、*Raphistoma*、*Lophospira*、*Trochonema*等，一间房组(达瑞威尔期)产有*Lesueurilla* (余汶和席与华, 1995). 滇西保山施甸组和蒲缥组有少量中-晚奥陶世的腹足类记录，包括*Holopea*、*Sinuites*和*Temnodiscus*等(Reed, 1917).

3.4 珊瑚

青藏高原地区的奥陶纪珊瑚仅见于上奥陶统. 何心一(1990)报道了西藏普兰、札达地区上奥陶统幕霞组中的*Yohophyllum*、*Calostylis*、*Brachyelasma*、*Lam-*

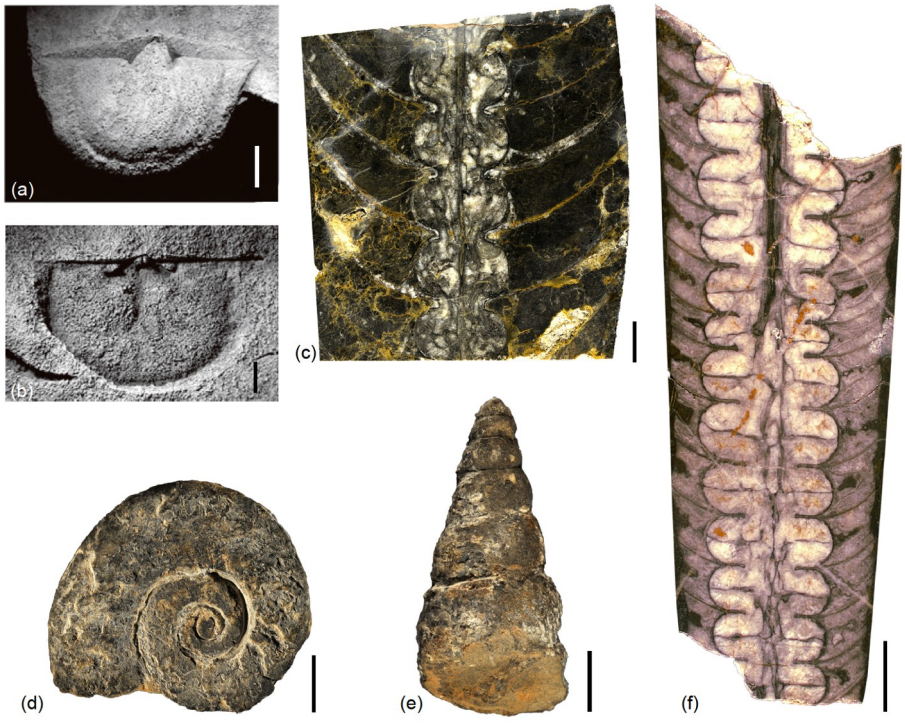


图 9　青藏高原地区奥陶纪典型壳相化石

(a)、(b) 腕足动物*Aporthophyla perelegans*, (a) NIGP156575, (b) NIGP156592, 产自西藏聂拉木阿来组(Zhan等, 2014a); (c) 头足类*Wadema xizangensis*, NIGP71426, 产自西藏聂拉木阿来组(陈挺恩, 1983b; 张元动等, 2020); (d) 腹足类*Maclurites* cf. *xizangensis*, NIGP174605, 产自西藏聂拉木阿来组(Li等, 2023); (e) 腹足类"*Hormotoma*" *ordosensis*, NIGP174612, 产自西藏聂拉木阿来组(Li等, 2023); (f) 头足类*Armenoceras xizangense*, NIGP166267, 产自西藏申扎地区拉塞组(Fang等, 2018b). 比例尺: (a)和(b)为2mm, 其他为1cm

belasma, 据此建立的*Yohophyllum-Lambelasma*组合被认为可与四川宁南的"上巧家组"(最近厘定为华弹组; 见王光旭等, 2021, 2022a)和巴塘物洛吃普组下部的珊瑚动物群对比(林宝玉, 1965; 邓占球和章炎生, 1984), 时代为晚奥陶世早期. 同时, 何心一(1990)在札达达巴劳地区的下拉孜上组中建立了*Kenophyllum-Plasmoporella*组合, 认为层位高于前一组合, 属晚奥陶世晚期.

在晚奥陶世早期, 皱纹珊瑚Calostylidae科的*Calostylis*、*Ningnanophyllum*、*Yohophyllum*在川西(中咱地块)、藏南、柴达木(疑似)等地也都有产出记录(Wang和Chen, 1991). 祁连地区的上奥陶统扣门子组产出*Agetolites*、*Agetolinus*、*Heliolites*和*Wormsipora*等珊瑚(邓占球和李璋荣, 1979). 新疆库鲁克塔格地区上奥陶统乌里格孜塔格组中产出*Leolasma*、*Sinkiangolasma*、*Plasmoporella*、*Khangailites*、*Wormsipora*和*Propora*等(俞昌民, 1960; Cui和Wang, 2021).

3.5　几丁虫

青藏高原地区奥陶纪几丁虫目前尚未有任何报道, 周边地区零星记录主要集中在中-晚奥陶世地层. 印度北部喜马拉雅地区上奥陶统Pin组含有*Conochitina elegans*、*Sphaerochitina actonica*、*Euconochitina lepta*、*Spinachitin*a cf. *cervicornis*、*Spinachitina bulmani*等, 可以与牙形刺*Amorphognathus ordovicicus*带对比, 时代为凯迪期(Wang等, 2021).

在滇东北巧家地区的红石崖组底部识别出扬子台地弗洛晚期-大坪初期的特征几丁虫组合——*Bursachitina maotaiensis-B. qianbeiensis*组合(Liang等, 2020), 顶部发现*Lagenochitina obeligis*、*Sagenachitina* cf. *dapingensis*和*Belonechitina chenjiawuensis*, 在晚奥陶世华弹组发现凯迪期常见的几丁虫*Lagenochitina prussica*、*Spinachitina bulmani*和*S. fossensis*(Liang等, 2023). 在滇东北永善地区上奥陶统大渡河组可识别出*Eise-*

*nackitina ripae*几丁虫化石带, 时代为凯迪期-赫南特早期(唐鹏等, 2017).

在柴达木地区石灰沟组中可以识别出达瑞威尔期的*Conochitina turgida-C. subcylindrica*带(Wang等, 2018). 张师本等(2007)依据塔里木周缘地区的化石材料, 在中-上奥陶统建立了18个几丁虫化石带.

3.6 放射虫

青藏高原地区的奥陶纪放射虫主要包括祁连地区中奥陶世达瑞威尔期的*Etymalbaillella yennienii*动物群(Li, 1995), 以及在新疆库鲁克塔格地区的中奥陶统大坪阶黑土凹组中建立的*Tetrasphaera kuruktagensis*带, 后者包括下部的*Protosegmentum xinjiangensis*亚带和上部的*Quasibeothuka fusiforma*亚带, 可与大坪晚期的*Exigraptus clavus*笔石带对比(王玉净等, 2008). 北祁连地区中奥陶世增生杂岩中的硅质岩发育以*Protoceratoikiscum*为主的放射虫动物群(Yan等, 2021).

4 古地理演化

根据区域构造、古地理和地层资料, 中国奥陶纪具有多个板块、地体和活动带, 可以划分成13个地层区(张元动等, 2021b; Zhang等, 2023), 青藏高原及其周边地区涉及其中9个(图2). 根据前人的古板块重建意见, 这些板块或块体在奥陶纪时期多数位于冈瓦纳大陆东北缘地区, 总体呈分散状态, 但是相距并不远(图9; Scotese, 2014; Burrett等, 2014; Cocks和Torsvik, 2021; Metcalfe, 2021). 由于当时是否存在原特提斯有较大争议, 这些板块或块体的地理位置, 以及在整个奥陶纪期间的漂移和古地理演化历史成为目前地学研究的焦点之一(Zhao等, 2018; 吴福元等, 2020; Metcalfe, 2021). 由于当时海洋总体特征的均质性, 生物分布的连续性较高, 不同生物地理区之间的分类单元差异几乎只反映在属、种级别上. 青藏高原及其周边地区的奥陶纪各门类生物古地理的系统研究可以为板块重建提供古生物地理方面的依据(Servais等, 2023).

4.1 生物古地理

4.1.1 早奥陶世

由于泛非运动和其他地质事件的影响, 早奥陶世地层在青藏高原地区发育较少或缺失, 该时期的古生物地理研究相对薄弱, 仅有少量三叶虫、头足类的相关研究.

喀喇昆仑地区具有特马豆克期-弗洛早期的浅水相三叶虫动物群, 包括*Neopsilocephalina*、*Psilocephalina*、*Psilocephalops*、*Songtaoia*和*Asaphopsoides*, 塔里木北部的乌里格孜塔格地区发现三叶虫*Asaphaopoides*和*Paraszechuanella*, 这些都是在华南扬子区广泛分布的三叶虫类型, 推测这两个区域与华南在早奥陶世相距较近, 具有密切的生物地理关系(周志毅等, 2009).

藏南聂拉木的下-中奥陶统阿当组中产出少量的*Manchuroceras*(东北角石)和*Hopeioceras*(河北角石), 该头足类动物群主要分布于华北的亮甲山组和华南的红花园组中, 同时与北美早奥陶世常见的内角石动物群有密切的亲缘关系(陈挺恩, 1984). 同样, 在聂拉木地区出现的早奥陶世三叶虫*Pseudocalymene*, 以及阿里札达地区记录的三叶虫*Basilicus* (*Basilicus*)、*Hystricurus*和*Pliomerina*等, 都是华北同期地层的重要类型(钱义元, 1976; 杨家驎, 1990; 周志毅等, 2009).

4.1.2 中奥陶世

中奥陶世是奥陶纪生物大辐射的关键时期, 该时期海洋生物多样性迅速增加, 生态系统变得高度复杂化, 全球生物地理分区也达到了前所未有的复杂程度(Droser等, 1995). 对于这一重大生物古地理演化, 在青藏高原及其周边地区也有相应的响应记录, 主要体现在头足类、腹足类、腕足动物和三叶虫等门类上.

中奥陶世冈瓦纳周缘地区的头足类古生物地理研究表明, 56%的属一级分类单元仅仅分布在单一板块或块体, 也就是土著属. 此时, 喜马拉雅、拉萨、滇缅马地体都与华北板块有非常密切的亲缘关系, 组成了华北-西藏-滇缅马生物区(简称NTS生物区; 图10a; Fang等, 2019). 该区系的特征类型主要包括*Ordosoceras*、*Discoactinoceras*、*Mesowutinoceras*、*Paratunkuskoceras*和*Pomphoceras*等属. 还有部分类型虽然只在这个生物区出现, 但并不广布, 仅在其中个别区域有记录, 如*Polydesmia*、*Sactoceras*、*Parakogenoceras*和*Pararmenoceras*等属. NTS生物区的特征类型以珠角石类为主, 也有一些假直角石类. 珠角石是体管粗大呈串珠状、体管和气室具有大量沉积的头足类, 假直角石同样在体管和气室内存在大量沉积, 这两类头

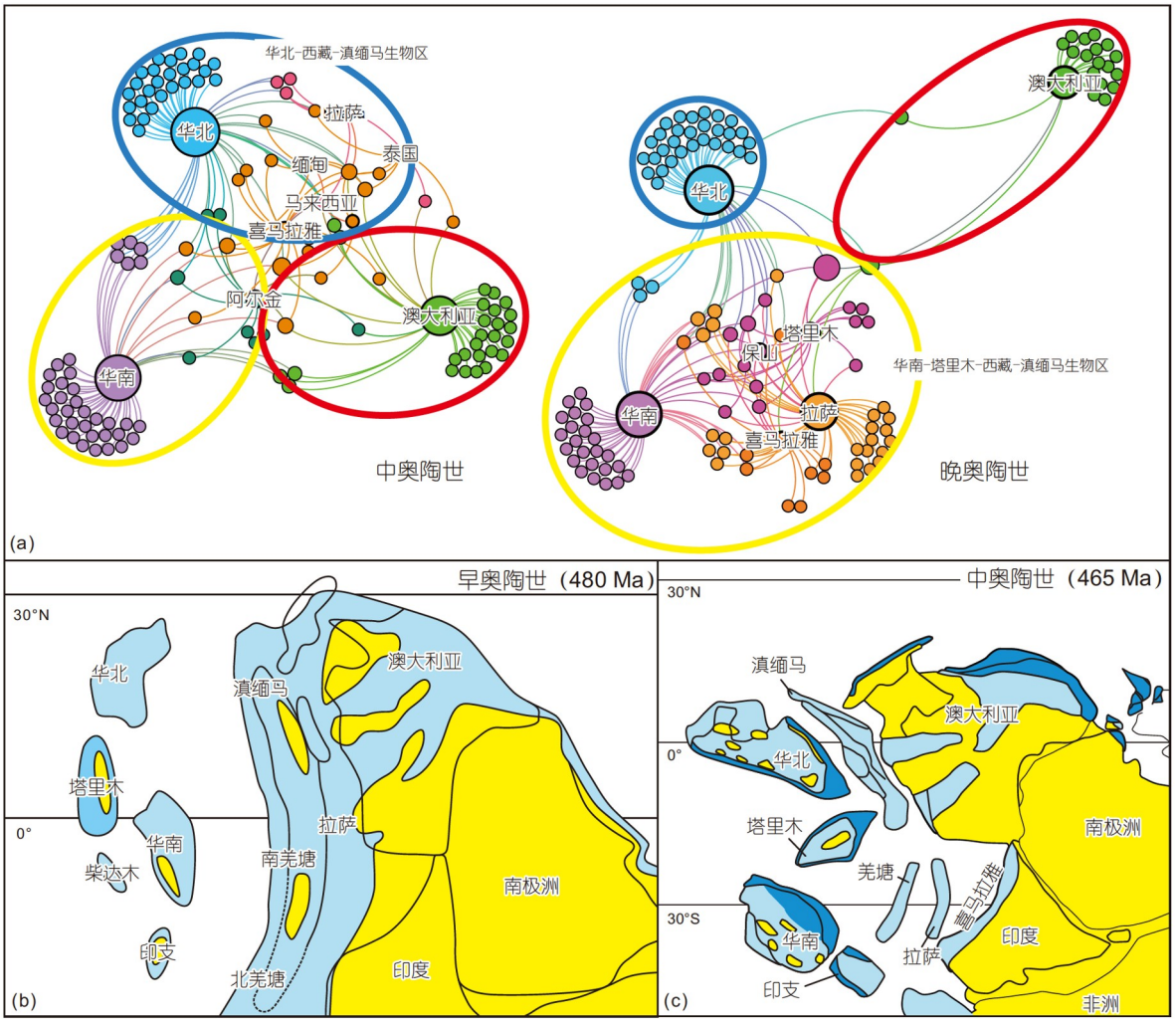


图 10　中-晚奥陶世头足类生物地理区系网络分析和冈瓦纳东北缘和东冈瓦纳地区奥陶纪古板块重建

(a) 改自Fang等(2019); (b) 改自Metcalfe(2021), 蓝色指示浅海, 黄色代表陆地; (c) 改自Burrett等(2014)、Yu等(2019), 浅蓝色指示浅水台地, 深蓝色代表深水盆地, 黄色代表陆地

足类在个体发育过程中需要吸收大量的钙质用以填充气室及体管(图9c、9f). 这些现象表明, 以它们为特征的NTS生物区位于赤道附近的低纬度热带区域, 温暖的海水有助于碳酸钙的过饱和沉淀, 从而为头足类发育提供了重要条件(Fang等, 2019). 同时, 在藏南、阿尔金地区还产出*Wadema*和*Mesaktoceras*等澳大利亚特征类型, 这提供了关于喜马拉雅、阿尔金等地与澳大利亚动物群交流的证据(图9c; 陈挺恩, 1981, 1983b).

聂拉木地区中奥陶世的腹足类动物群以*Maclurites*占绝对优势(图9d、9e), 同时伴随少量的"*Hormotoma*"和*Tropidodiscus*, 可以和华北板块西缘同期的*Maclurites*群落进行对比(余汶, 1961; Li等, 2023). 该腹足类组合特征与北美以及华北西缘的生活在底栖生物组合BA2-4环境中的*Maclurites*群落高度相似(余汶, 1961; Rohr, 1980; Ebbestad等, 2013).

滇西保山地区施甸组中的*Saucrorthis*腕足动物群包括25个属, 与掸邦北部Naungkangyi组里面发现的腕足动物群非常相似(Zhan等, 2014c). *Saucrorthis*动物群是低纬度气候带的代表类型, 分布范围呈地区性. 而同时期的、分布更广的*Aporthophyla*动物群则在西藏聂拉木地区有记录, 也指示其具有特定的纬度带分布(Zhan等, 2014a).

在滇西保山施甸组、缅甸掸邦北部Naungkangyi组、泰国南部地区Thung Song群等中奥陶世地层中,

都记录了典型的华南三叶虫动物群, 如*Birmanites*、*Hexacopyge*、*Ovalocephalus*和*Sinocybele*等(Kobayashi和Hamada, 1964; 罗惠麟, 1974; 盛莘夫, 1974; Fortey和Cocks, 1998). 据此推测, 在滇缅马块体北部的滇西地区应处于低纬度, 与华南相距不远, 而马来半岛应位于赤道附近, 与华北接近(Zhou等, 1998). 云南大理(印支地体)向阳组产出的三叶虫*Neseuretus*、*Ogyginus*、*Hanchungolithus*、*Hungioides*和*Cyclopyge*等, 则是典型的冈瓦纳型动物群, 和南中欧、扬子区可以对比(Zhou等, 1998; 周志毅等, 2001, 2009). 在大地构造上属于松潘-甘孜地块的四川木里等地, 李善姬(1978)报道有*Neseuretus*和*Aristocalymene*等三叶虫, 显示了该地区与扬子区当时可能存在密切的生物古地理关系. 塔里木巴楚-柯坪地区大坪阶上丘里塔格组上部产出的三叶虫动物群虽然面貌上接近华南板块, 但是其中产出bathyurids类, 表明塔里木板块更接近赤道(周志毅等, 1989). 塔里木地区奥陶纪的三叶虫宏演化型式和劳伦板块相似, 在达瑞威尔早期, 二者台缘相的动物群存在一些相同的分子.

4.1.3 晚奥陶世

进入晚奥陶世, 青藏高原及其周边地区头足类的丰度较中奥陶世有所增加, 并表现出明显的地方性. 其中, 近75%的属一级分类单元为土著属, 少有广布类型. 此时滇缅马地区、塔里木地区以及西藏地区的大部分区域的头足类表现出与华南地区更接近的亲缘关系(华南-塔里木-西藏-滇缅马生物区, 简称STTS生物区; 图10a; Fang等, 2019), 特征类型包括*Sinoceras*、*Lituites*、*Richardsonoceras*、*Hsiangyangoceras*和*Archigeisonoceras*等, 主要为喇叭角石类、直角石类和箭钩角石类. 其中, 喇叭角石类在中奥陶世仅在华南生物区出现, 在晚奥陶世才扩散到多个生物区(Fang等, 2019).

在滇西保山地区的上奥陶统蒲缥组中仅发现*Foliomena folium*一个腕足动物类群. 组内的腕足动物与大量的三叶虫化石保存在一起, 包括*Nankinolithus*和*Cyclopyge*等, 指示了深水、低能、贫营养的环境(Rong等, 1999). 同时, 在泰国南部Satun地区发现了*Foliomena folium*和*Christiania* sp., 一定程度上指示滇缅马地区的腕足动物群可与华南对比(Cocks和Rong, 1988).

对滇缅马地体与相邻块体的赫南特贝动物群以及三叶虫动物群的研究显示: 在晚奥陶世末期, 滇缅马地体与华南、拉萨等块体相距较近, 可能均处于冈瓦纳大陆东北缘的热带浅水海域(倪寓南等, 1981; Cocks和Fortey, 1997; Chen和Rong, 2019; Huang等, 2020; Rong等, 2020a).

4.2 古板块重建

从20世纪70年代开始, 就有专家提出了“原特提斯”概念(Burrett, 1973; 常承法等, 1982; 潘裕生和陈挺恩, 1998). 这一概念是指从前寒武纪开始就存在一个位于冈瓦纳大陆与亚洲板块之间的大洋, 后来大致在奥陶-志留纪时期闭合(Li等, 2018). 特提斯地质研究中一个非常重要的问题是域内地块是否与冈瓦纳大陆存在亲缘关系, 这对研究板块演化历史具有重要意义(Torsvik和Cocks, 2013; 吴福元等, 2020). 原特提斯域位于青藏高原北缘, 也曾被称为“秦祁昆洋”(边千韬等, 2001), 具体表现是在北阿尔金-北祁连-宽坪、阿尔金-柴北缘-商丹、库地-昆中、康西瓦-阿尼玛卿-勉略等几条缝合带中都发育530~480Ma左右的蛇绿岩(吴福元等, 2020). 此外, 在龙木错-双湖-昌宁-孟连缝合带中也有古生代的蛇绿岩, 显示原特提斯和古特提斯可能共存(李才等, 2016). 这些缝合带所限制的块体应该在奥陶纪, 至少在早-中奥陶世都是原特提斯洋的块体. 所以, 东冈瓦纳和冈瓦纳东北缘地区的板块重建一直是早古生代地质研究的重点. 其中柴达木、滇缅马、印支等块体的古地理位置还存在争议(图10b、10c; Burrett等, 2014; Torsvik和Cocks, 2017; Metcalfe, 2021; Scotese, 2021). 原特提斯持续演化体现为, 在奥陶纪的不同阶段多个化石门类在不同板块之间的亲缘关系持续发生变化. 其中由于华南、华北等块体的研究程度较高、化石记录较为完整, 往往在生物古地理、古地磁研究中占据重要位置(Han等, 2015; Fang等, 2019).

头足类生物地理显示, 中奥陶世属于NTS生物区的喜马拉雅、拉萨和滇缅马地区(泰国、马拉西亚)盛产珠角石类; 而到晚奥陶世则由喇叭角石类和直角石类所取代, 位于STTS生物区中. 因此可以推测, 喜马拉雅、拉萨和滇缅马地区在中奥陶世与华北生物亲缘关系较密切, 板块之间的距离较近, 并且相较华南板块更靠近澳大利亚板块, 都位于赤道附近的热带地区(Fang等, 2018b, 2019). 进入晚奥陶世, 喜马拉雅、拉

萨和滇缅马块体可能开始与华南以及东冈瓦纳大陆接近, 同时远离华北板块, 致使该区域头足类生物面貌发生重大变化, 表现出与华南的密切关联. 陈挺恩(1983b, 1984)提出, 由于晚奥陶世藏南喜马拉雅和拉萨地区的头足类动物区系演化相似, 二者当时可能均同属于泛大陆的陆棚浅海, 并且与澳大利亚联成一体, 澳大利亚、塔里木以及柴达木等地区则以西藏地区作为中间通道相互连通, 形成频繁的头足类动物群交流.

Yu等(2019)通过对聂拉木中奥陶统的岩石微相分析, 发现其中有大量岩屑、核形石和鲕粒, 指示聂拉木地区当时处于温暖的高能浅海沉积环境, 推测喜马拉雅地体在该时期是一个热带或者亚热带地区(Harper等, 2011; Yu等, 2019). Shabbar等(2023)在印度北部的Spiti地区奥陶系中发现与壳相化石共生的非钙化型藻类, 同样指示了该地区位于受间歇风暴影响的暖水区域. Burrett等(2014)通过开展碎屑锆石地球化学研究, 提出中奥陶世中国华北板块与滇缅马、西藏地区, 以及澳大利亚的Canning盆地之间存在古通道, 并且有碎屑物质的传输和交换.

三叶虫古生物地理研究显示, 中国的多数块体, 包括青藏高原及其周边地区, 在早奥陶世和奥陶纪末两个时段都属于同一个生物地理区, 而在中奥陶世-晚奥陶世早期则被划分为两个区: 一个包括华南、塔里木和印支, 另一个包括华北、滇缅马和藏南(周志毅等, 1989).

5　重大地质事件

青藏高原及其周边地区奥陶纪地层的发育和动物群的分布, 与区域古地理和构造格局密不可分, 也与该时期发生的地质事件有关. 其中, 整个喜马拉雅地区广泛存在的、时限跨度不等的奥陶纪早期地层缺失, 指示了寒武纪晚期-奥陶纪早期发生的库尔加克运动(晚泛非运动)的重大影响; 中奥陶世出现的暖水生物和鲕粒灰岩, 晚奥陶世早期发育的海相碳酸盐岩红层, 以及在滇缅马等地缺失凯迪中期地层, 也都是青藏高原及周边地区对一些区域性乃至全球性地质事件的响应.

5.1　库尔加克运动对地层的影响

在喜马拉雅地区, 世界最高峰——珠穆朗玛峰峰顶的地层为奥陶系珠穆朗玛峰组, 是一套灰色细粒块状结晶灰岩, 根据定日附近产出的三叶虫、腕足类化石, 确定珠穆朗玛峰组的大致时代是中奥陶世(尹集祥和郭师曾, 1978). 在珠峰峰顶, 珠穆朗玛峰组的结晶灰岩与下伏的黄带层为断层接触, 其中黄带层岩性为石英岩和千枚岩互层(Myrow等, 2009). 此断层接触面在喜马拉雅地区是广泛存在的, 从印度-尼泊尔到中国藏南聂拉木、定日, 以及不丹地区, 在奥陶系与下伏寒武系之间普遍存在寒武纪晚期-奥陶纪早期地层断层接触的现象(图11), 二者之间在多数地点表现为平行不整合, 并在上覆地层的底部发育底砾岩. 许多专家认为, 这是一个区域性重大构造-热事件——库尔加克运动造成的(Myrow等, 2016).

周志广等(2004)在藏南康马地区发现奥陶系不整合覆盖于前奥陶系拉轨岗日群之上. 李才等(2010a)在申扎地区多条剖面上也发现了奥陶纪的底砾岩, 其砾石成分以变流纹岩为主, 砾岩层与下伏的寒武系呈高角度不整合接触. 从下伏的变流纹岩中获取的锆石年龄, 指示其时代为寒武纪(程立人等, 2005; Hu等, 2013). 与之相关的是, 在滇西保山龙陵、施甸等地识别出早奥陶世地层普遍缺失的现象, 在龙陵一带缺失寒武纪晚期-早奥陶世地层, 在施甸地区则主要缺失早奥陶世(或包括部分中奥陶世)地层, 中-上奥陶统与寒武系上部之间总体则呈平行不整合接触或者微角度不整合接触(黄勇等, 2009, 2012). 这一系列地层缺失现象都是库尔加克运动在区域上的响应.

库尔加克运动, 即晚泛非运动(又称Bhimphedian运动; Cawood等, 2007; Metcalfe, 2021)为寒武纪晚期-奥陶纪早期的一个区域性构造-热事件. 该运动的发生和延续时间与广泛影响东冈瓦纳大陆和喜马拉雅地体的泛非运动最后一幕基本一致(Garzanti等, 1986; Kröner和Stern, 2004; Myrow等, 2009, 2010, 2016; Liu等, 2015). 泛非运动以发生于600~500Ma的构造-热事件为主要表现形式, 使得位于东冈瓦纳大陆与西冈瓦纳大陆之间的莫桑比克洋关闭, 导致东西两个陆块聚合成冈瓦纳超大陆, 最典型的地质记录是奥陶系不整合覆盖在寒武系及更老的基底岩系之上(Myrow等, 2009). 库尔加克运动与华北地区怀远运动第一幕、西澳Samphire Marsh伸展事件、东澳Delamerian运动、南极洲Ross运动第三幕的发生时间大致相同(Shaw等, 1994; Greenfield等, 2010; Zhen等, 2016; Hashimoto等,

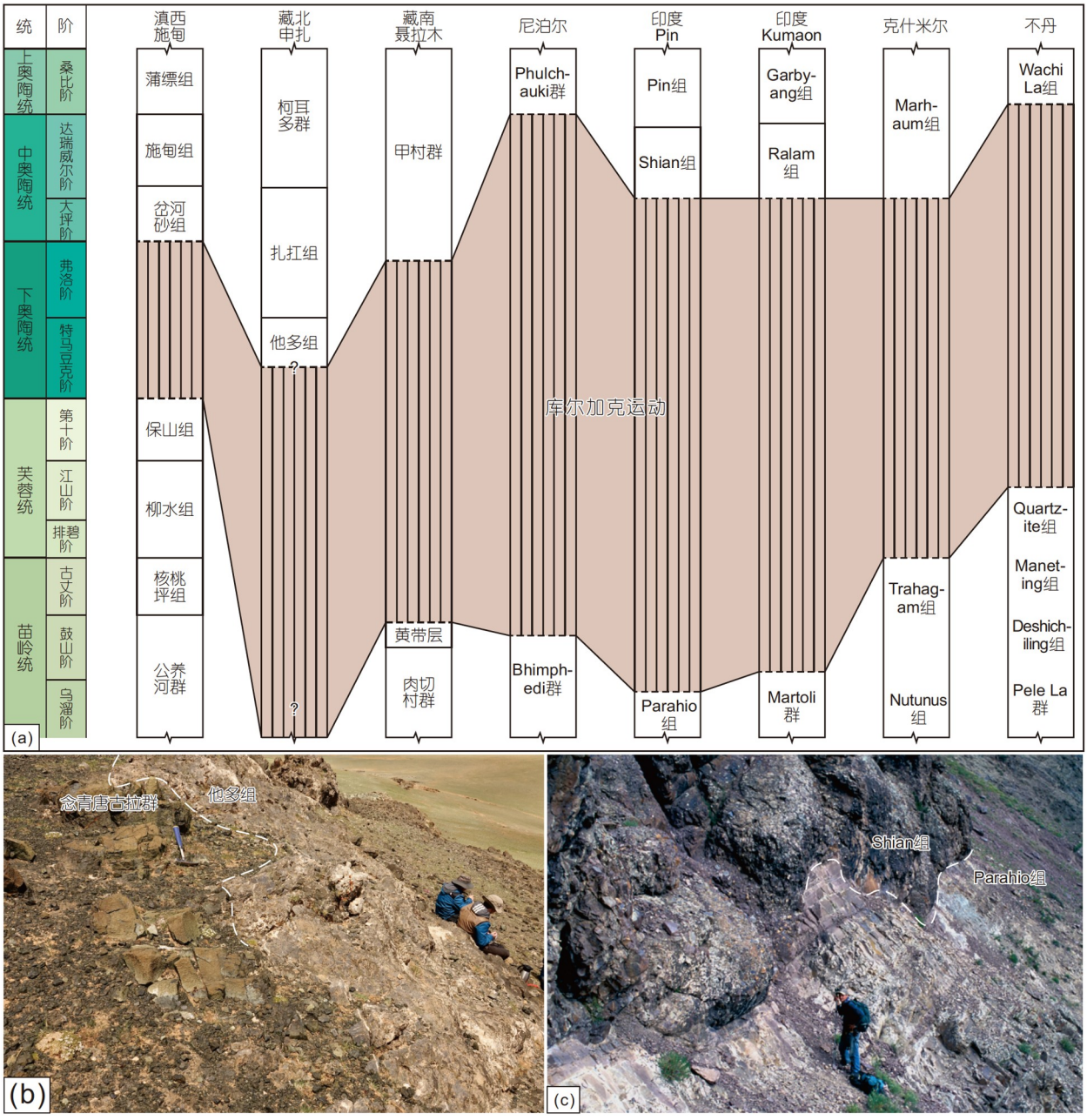


图 11　库尔加克运动(晚泛非运动)在青藏高原及其周边地区的响应

(a) 西藏和南亚地区奥陶系与下伏地层之间广泛存在地层缺失(数据来源: 黄勇等, 2012; 方翔等, 2020; Myrow等, 2023); (b) 西藏申扎地区奥陶系他多组与下伏地层的不整合面; (c) 印度北部Shian组和下伏Parahio组之间的不整合面(Myrow等, 2018)

2018; Zhen等, 2019), 可能具有相同或相似的构造地质学背景.

5.2　奥陶纪末冰期对地层的影响

在滇西保山和芒市地区的上奥陶统上部存在一个地层间断和平行不整合面, 其发生时间和下伏地层中化石的古生态学特征, 都显示出与奥陶纪末赫南特期的全球性冰期气候及海平面陡降事件可能存在密切关联(图12; Brenchley和Štorch, 1989; Bergström等, 2006, 2014). 这次全球性的海平面陡降事件大致始于凯迪末

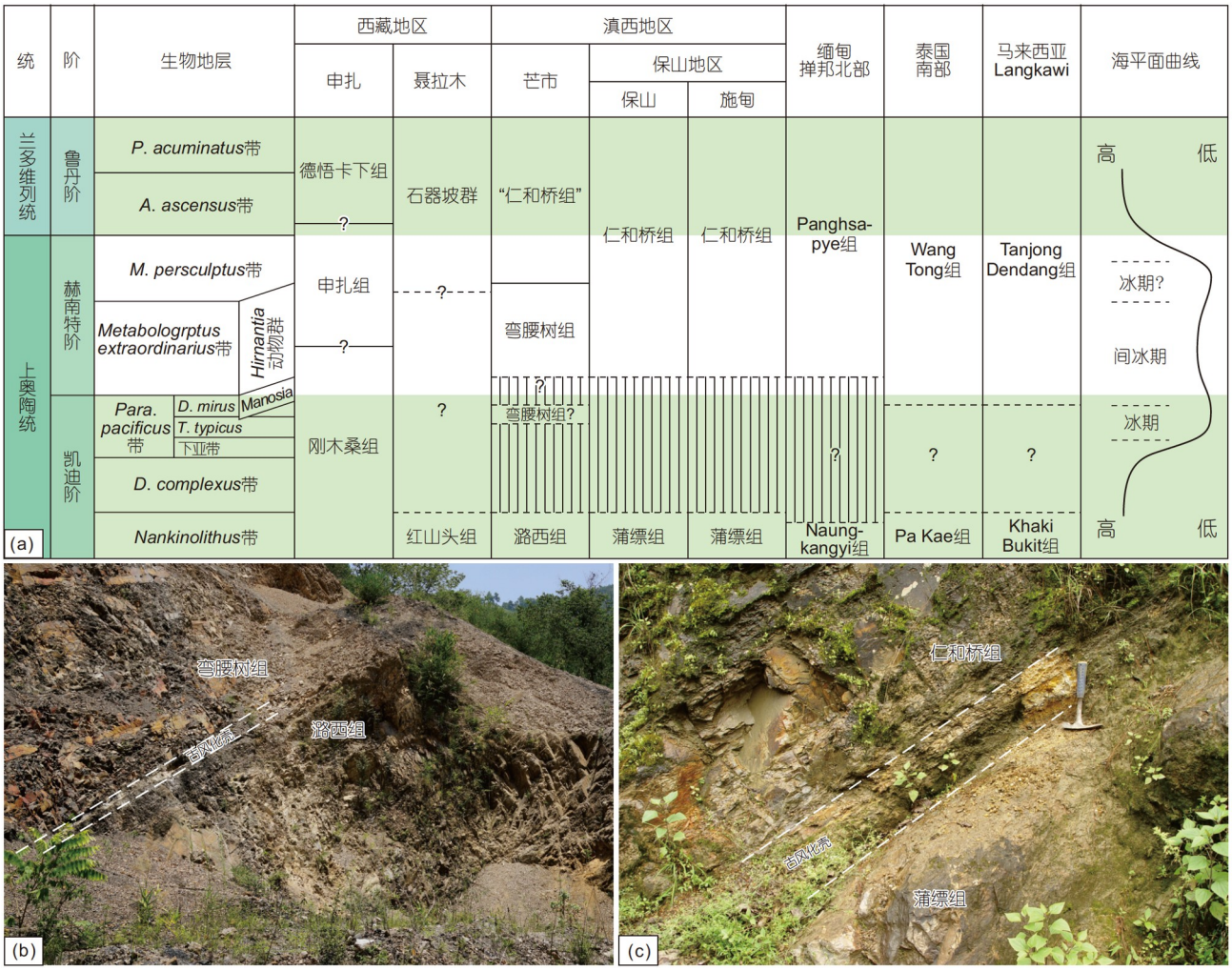


图 12　奥陶纪末冰期事件在青藏高原及其周边地区的响应

(a) 滇西和东南亚地区晚奥陶世地层序列(改自Fang等, 2018b); (b) 滇西芒市上奥陶统潞西组和弯腰树组之间平行不整合; (c) 滇西保山上奥陶统蒲缥组和仁和桥组之间平行不整合

期, 导致滇西地区沉积间断和地层剥蚀, 致使上奥陶统相当于*Dicellograptus complanatus*带和*Dicellograptus complexus*带的地层全部缺失(Fang等, 2018a). 在随后的间冰期, 因为海平面的适度回升, 形成了芒市地区弯腰树组下部的碎屑岩沉积, 保山、施甸等地的仁和桥组底部黑色页岩沉积, 以及西藏申扎地区的申扎组黑色页岩. 第二幕冰期规模较小, 导致海平面再度下降, 形成芒市地区*Hirnantia*动物群的繁盛, 但未在保山地区造成明显沉积间断和地层缺失. 赫南特冰期事件大致结束于赫南特晚期, 相当于*Metabolograptus persculptus*带中部, 气候转暖和海平面的急速回升, 形成了该地区广泛的黑色页岩沉积, 与华南大部分地区情况类似(Zhang Y D等, 2014; Fang等, 2018a).

在凯迪中-晚期, 保山和芒市地区都属于陆棚沉积环境(云南省地质矿产局, 1990, 1995). 但是, 该时期这两个地区的岩相却不尽相同: 保山地区的蒲缥组为紫红色或淡黄色粉砂质泥岩夹微晶灰岩, 为水下隆起的浅水陆棚环境; 然而, 芒市地区的潞西组是一套粉砂岩、砂岩的粗碎屑岩, 代表了一个有大量陆源碎屑快速供给的近岸环境(云南省地质矿产局, 1990). 在凯迪晚期到赫南特初期, 这两个地区都缺失地层记录, 形成假整合, 应与全球性冰川活动导致的海平面下降和暴露剥蚀有关. 在保山的蒲缥组顶部和芒市潞西组顶部, 均存在一层黏土岩、黏土质泥岩, 并且在芒市地区多

个剖面的潞西组顶部存在多层铁锰线(云南省地质矿产局, 1990). 这些标志层的出现代表了由于海平面下降所导致的地层暴露和风化剥蚀事件, 是风化壳性质的沉积(图12). 在赫南特早期, 芒市地区形成弯腰树组沉积, 并发育*Hirnantia*动物群(Huang等, 2020), 而保山地区缺失该套地层和动物群, 则与滇西地区当时的古地理格局有关. 芒市地区虽更靠近南边的古陆, 但具有更陡峭的古地形, 海水更深一些, 从而导致大量陆源碎屑快速搬运到沉积区, 形成芒市地区的低成熟度的粗碎屑岩沉积; 保山和施甸的海底地形相对平坦、水体较浅, 但离岸较远、沉积速率较慢, 在海平面下降时缺失更多地层.

除滇西地区以外, 西藏南部的晚奥陶世地层也可能存在地层间断现象. 在聂拉木, 上奥陶统红山头组中化石较少, 仅发现少量头足类, 包括*Sinoceras chinense*、*Trocholites* sp.、*Stereoplasmoceras* sp.、*Michelinoceras paraelongatum*和*Michelinoceras* sp.(陈挺恩, 1984; 宋佳祺, 2023). 其时代为晚奥陶世凯迪早-中期, 未发现凯迪晚期-赫南特期的典型头足类化石. 红山头组上覆地层为石器坡组, 后者底部时代大致相当于*Metabolograptus persculptus*带-*Parakidograptus acuminatus*带(林宝玉和邱洪荣, 1982), 因此在红山头组与石器坡组之间可能缺失凯迪晚期-赫南特早中期的地层. 但是在藏北申扎地区, 上奥陶统刚木桑组顶部产出头足类*Pleurorthoceras*, 可以推测其顶界大致相当于*Metabolograptus extraordinarius*带, 为赫南特早期(陈挺恩, 1987; 邹西平, 1985), 而上覆地层申扎组底部可确定为*Metabolograptus persculptus*带(Mu和Ni, 1983), 表明二者之间为整合接触. 因此, 晚奥陶世的全球性冰期事件在西藏地区的不同块体上, 具有不同的地层沉积响应, 可能与特定的岩相和沉积环境有关.

5.3 碳同位素漂移事件

近年来, 青藏高原的碳同位素地层学研究得到逐步开展. 西藏申扎、聂拉木地区凯迪阶中部之下的奥陶纪地层主要为灰岩夹白云质灰岩和粉砂岩(Zhen等, 2020), 具备开展无机碳同位素研究的条件, 而凯迪阶上部到赫南特阶主要为页岩, 可以开展有机碳等相关地球化学分析. Yuan等(2018)最先报道了西藏申扎地区上奥陶统的无机碳同位素分析结果, 显示刚木桑组下部出现一个单样品正漂移事件, 有可能是HICE事件, 但还需要更多研究加以证实. 凯迪阶无机碳同位素结果主要表现为刚木桑组中δ^{13}C自+1.5‰到+0.7‰的逐步下降现象. 随后, 无机碳同位素结果在德悟卡下组下部页岩序列中出现一个明显的正漂移事件, 被识别为HICE事件(Yuan等, 2018). 近期, Yu等(2019, 2021)在较好的生物地层约束基础上, 在聂拉木甲村剖面阿来组和甲曲组下部(牙形刺*Histiodella kristinae*到*Pygodus serra*带)识别出达瑞威尔期中期的碳同位素正漂移事件(MDICE), 该漂移始于阿来组中部, 在甲曲组下部达到峰值(图13).

在青藏高原周边地区, 已开展较多化学地层学研究. 近年来, 许多专家学者对塔里木地区的大量露头剖面和钻井岩芯进行了无机碳同位素地层学研究(图13; 例如, Jing等, 2008; Liu等, 2016; Zhang和Munnecke, 2016; Zhao等, 2017). 其中, 柯坪水泥厂剖面下奥陶统无机碳同位素分析结果显示, 在*Teridontus huanghuachangensis*牙形刺带中出现奥陶系第一个正漂移事件, 穿越寒武系-奥陶系界线(Jing等, 2008). 在巴楚大坂塔格2号剖面, 特马豆克阶的δ^{13}C值在−2‰~−1‰之间波动, 并在特马豆克阶顶部达到一个较小峰值(−0.47‰) (Zhang和Munnecke, 2016). 弗洛阶和大坪阶的δ^{13}C值主要在−3‰~−1‰之间波动. 而在大坪阶顶部-达瑞威尔阶下部, δ^{13}C快速升高到0‰左右. 在大坂塔格3号剖面的达瑞威尔阶下部, 存在一个较弱的正漂移事件, 但尚不明确是否有指示意义.

在柯坪大湾沟剖面的大湾沟组顶部和大坂塔格3号剖面的一间房组上部, 出现一个较小的δ^{13}C正漂移事件, 被识别为达瑞威尔中期碳同位素漂移事件——MDICE事件(Zhang和Munnecke, 2016). 根据牙形刺生物地层学研究结果, 在柯坪和巴楚地区大湾沟组灰岩和上覆地层萨尔干组黑色页岩之间可能存在地层间断, 导致无法识别出MDICE事件的上半部分曲线. 大湾沟剖面达瑞威尔阶中上部到桑比阶底部为萨尔干组, 岩性主要为黑色页岩夹薄层硅质灰岩, 其δ^{13}C在−2‰~1‰之间波动. 在大湾沟和大坂塔格3号剖面的桑比阶上部-凯迪阶下部(坎岭组-其浪组、吐木休克组-良里塔格组), 均出现一个峰值可达2.5‰的正漂移事件, 可与世界其他地区广泛识别的古滕贝格正漂移事件(GICE)进行对比(Zhang和Munnecke, 2016). 在凯迪中期之后, 塔里木板块主体抬升成陆, 仅有极少量地层剖面可用于无机碳同位素分析.

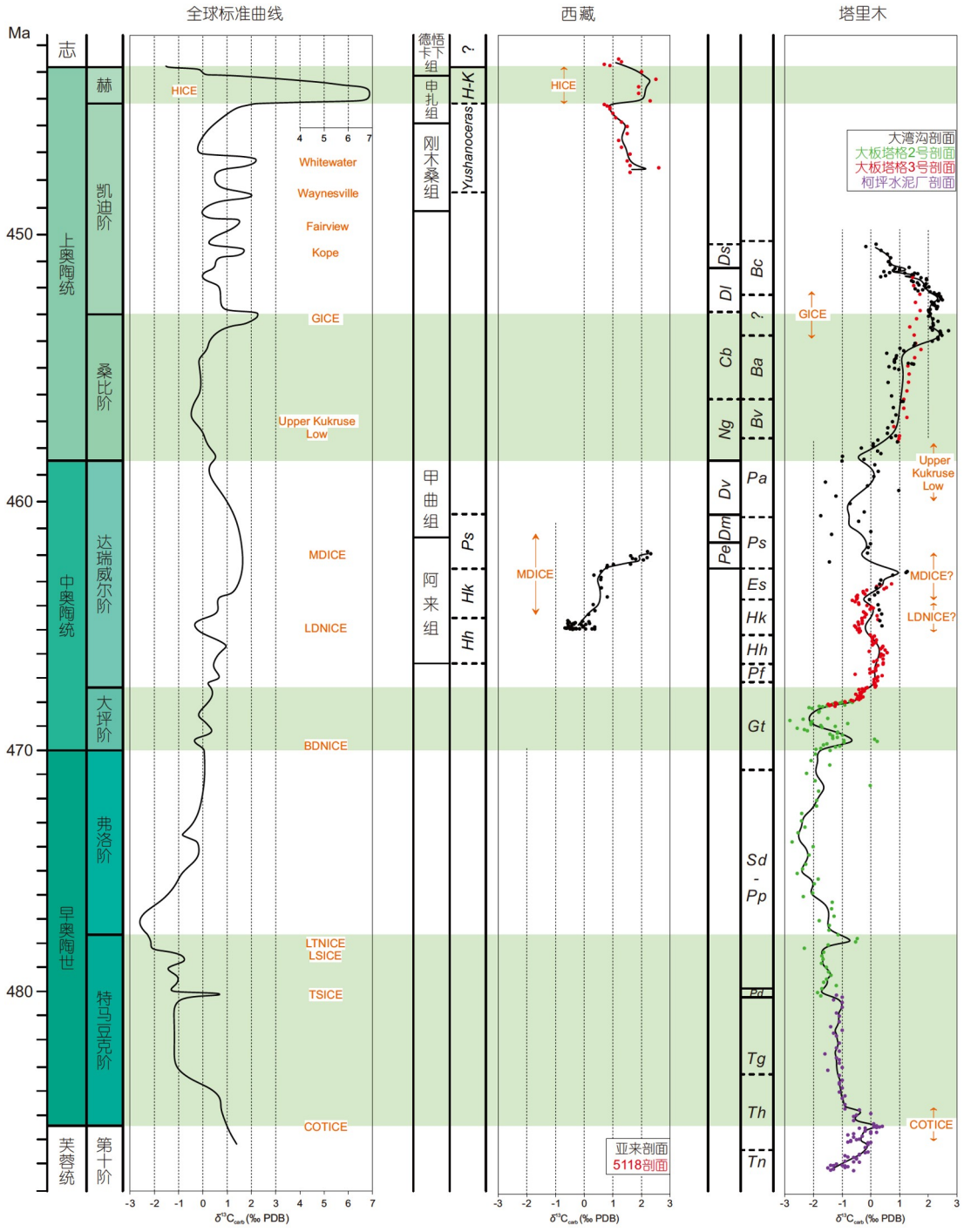


图 13　青藏高原及其周边地区碳同位素对比

志: 志留系; 赫: 赫南特阶. *Ba*: *Baltoniodus alobatus*带; *Bc*: *Belodina confluens*带; *Bv*: *Baltoniodus variabilis*带; *Cb*: *Climacograptus bicornis*带; *Dl*: *Diplacanthograptus lanceolatus*带; *Dm*: *Didymograptus murchisoni*带; *Ds*: *Diplacanthograptus spiniferus*带; *Dv*: *Dicellograptus vagus*带; *Es*: *Eoplacognathus suecicus*带; *Gt*: *Glyptoconus tarimensis*带; *H-K*: *Hirnantia-Kinnella*动物群; *Hh*: *Histiodella holodentata*带; *Hk*: *Histiodella kristinae*带; *Ng*: *Nemagraptus gracilis*带; *Pa*: *Pygodus anserinus*带; *Pd*: *Paltodus deltifer*带; *Pe*: *Pterograptus elegans*带; *Pf*: *Periodon flabellum*带; *Pp*: *Paroistodus proteus*带; *Ps*: *Pygodus serra*带; *Sd*: *Serratognathus diversus*带; *Tg*: *Teridontus gracilis*带; *Th*: *Teridontus huanghuachangensis*带; *Tn*: *Teridontus nakamurai*带. 改自Li和Zhang(2020)

6 结论

根据青藏高原奥陶纪地层记录及生物群特征, 可以划分为喜马拉雅、冈底斯-察隅、羌塘-昌都、松潘-甘孜、喀喇昆仑-昆仑-阿尔金等5个地层区, 它们与周边的滇缅马、印支、柴达木-祁连、塔里木-天山和扬子区(西缘)等多个地层区有密切关联, 可以对比. 通过对笔石、牙形刺和头足类等青藏高原及其周边奥陶纪常见化石门类的动物群和生物地层分析, 共识别出15个笔石带、9个牙形刺带、8个头足类带, 并结合腕足动物、三叶虫和几丁虫等生物群特征, 以及奥陶纪化学地层学记录, 建立了青藏高原的奥陶纪综合地层序列及其与周边地区奥陶系的对比关系.

青藏高原及其周边地区由多个块体组成, 头足类、三叶虫、腕足动物等壳相生物门类的古生物地理演化对于板块重建具有重要指示意义. 其中头足类在早-中奥陶世以珠角石类繁盛为特征, 显示出与华北板块的密切亲缘关系, 但到晚奥陶世则变为以喇叭角石和直角石类繁盛为特征, 表现出与华南的密切关系; 三叶虫也存在类似的古生物地理演化现象. 奥陶纪多门类的生物古地理演化研究, 为冈瓦纳东北缘地区的奥陶纪古板块重建提供了重要依据.

在西藏南部的喜马拉雅地体及其周边的滇缅马地体, 普遍存在寒武纪晚期-奥陶纪早期地层缺失现象, 表现为角度不整合接触, 显示了库尔加克运动这一构造-热事件对该地区沉积地层的巨大影响. 西藏南部中奥陶世发育鲕粒灰岩和暖水生物群, 指示当时位于赤道附近的低纬度地带. 喜马拉雅地区及滇缅马地体在晚奥陶世普遍发育大套具有网纹结构的海相碳酸盐岩红层, 可与华南扬子区的同期地层进行对比, 指示可能具有相同或相似的成因背景. 在滇西地区和缅甸掸邦等地普遍缺失凯迪晚期地层, 可能与奥陶纪末全球性冰期与海平面下降事件有关.

致谢 感谢评审专家审阅文稿, 并提出宝贵修改意见. 甄勇毅参加合作研究工作, 该文的发表经过澳大利亚新南威尔州地质调查所所长批准. 本文是国际地学计划(IGCP)700项目(东南亚古生代碳酸盐岩建造)和735项目(地层记录与奥陶纪生命崛起)的成果之一.

参考文献

边千韬, 罗小全, 李涤徽, 赵大升, 陈海泓, 徐贵忠, 常承法, 高延林. 2001. 青海省阿尼玛卿带布青山蛇绿混杂岩的地球化学性质及形成环境. 地质学报, 75: 45–55

常承法, 潘裕生, 郑锡兰, 张新明. 1982. 青藏高原地质构造. 北京: 科学出版社. 94

陈均远. 1975. 珠穆朗玛峰地区鹦鹉螺化石. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1966–1968)古生物(第一分册). 北京: 科学出版社. 267–308

陈均远, 王明倩. 1983. 新疆公格尔山地区珠角石类的首次发现. 青藏高原地质文集, 2: 81–89

陈挺恩. 1981. 西藏一些鹦鹉螺化石. 西藏古生物, 3: 261–282

陈挺恩. 1983a. 滇西宝塔期头足类动物群特征兼论“蒲缥组”. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 青藏高原研究: 横断山考察专集(一). 昆明: 云南人民出版社. 36–42

陈挺恩. 1983b. 乔治娜角石*Georgina*在西藏南部的发现及其意义. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 6: 117–132

陈挺恩. 1984. 西藏南部奥陶纪头足类动物群特征及奥陶系再划分. 古生物学报, 23: 452–471

陈挺恩. 1987. 申扎奥陶纪鹦鹉螺. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 11: 133–192

陈挺恩, 张允白. 2010. 藏北日土县拉竹龙地区志留系. 地层学杂志, 34: 397–409

陈挺恩, 耿良玉, 方宗杰, 王克良. 1986. 西藏东部中奥陶统的发现及奥陶系的划分对比. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 青藏高原研究: 横断山考察专集(二). 北京: 北京科学技术出版社. 1–7

陈旭, Mitchell C E, 张元动, 王志浩, Bergström S M, Winston D, Paris F. 1997. 中奥陶统达瑞威尔阶及其全球层型剖面点(GSSP)在中国的确立. 古生物学报, 36: 423–431

陈旭, 王志浩, 张元动. 1998. 中国第一个“金钉子”剖面的建立. 地层学杂志, 22: 1–9

陈旭, 张元动, 樊隽轩, 成俊峰, 李启剑. 2010. 赣南奥陶纪笔石地层序列与广西运动. 中国科学: 地球科学, 40: 1621–1631

陈旭, 张元动, 李越, 樊隽轩, 唐鹏, 陈清, 张园园. 2012. 塔里木盆地及周缘奥陶系黑色岩系的生物地层学对比. 中国科学: 地球科学, 42: 1173–1181

程立人, 杨日红, 王天武, 李才, 张予杰. 2001. 西藏申扎地区四笔石科(Tetragraptidae)分子的发现. 中国区域地质, 20: 333–335

程立人, 张以春, 张予杰. 2005. 藏北申扎地区早奥陶世地层的发现及意义. 沉积与特提斯地质, 29: 38–41

邓占球, 李璋荣. 1979. 床板珊瑚亚纲和日射珊瑚亚纲. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 青海地质科学研究所, 主编. 西北地区古生物图册: 青海分册(二). 北京: 地质出版社. 6–16

邓占球, 章炎生. 1984. 横断山脉古生代珊瑚. 川西藏东地区地层与古生物, 4: 1–102

董得源, 穆西南, 孙东立, 陈旭, 林尧坤. 1979. 西藏东部江达青泥洞早奥陶世地层. 地层学杂志, 3: 230

董致中, 王伟. 2006. 云南牙形类动物群: 相关生物地层及生物地理区研究. 昆明: 云南科技出版社. 347
方翔, 陈挺恩, 宋妍妍, 马譞. 2015. 湖北远安上奥陶统庙坡组鹦鹉螺动物群. 地层学杂志, 39: 321–329
方翔, 陈挺恩, 张允白, 李文杰, 张元动. 2017. 湘西中-上奥陶统大田坝组喇叭角石科鹦鹉螺动物群及其个体发育. 古生物学报, 56: 331–346
方翔, 李文杰, 于深洋, 甄勇毅, 张元动. 2020. 西藏南部和中部地区的奥陶系. 地层学杂志, 44: 349–365
何心一. 1990. 阿里奥陶纪四射珊瑚及横板珊瑚. 见: 杨遵仪, 聂泽同, 主编. 西藏阿里古生物. 武汉: 中国地质大学出版社. 20–22
黄勇, 邓贵标, 彭成龙, 郝家栩, 张国祥. 2009. 滇西保山南部早中奥陶世沉积缺失的发现及意义. 贵州地质, 26: 1–6
黄勇, 郝家栩, 白龙, 邓贵标, 张国祥, 黄文俊. 2012. 滇西施甸地区晚泛非运动的地层学和岩石学响应. 地质通报, 31: 306–313
景秀春, 杜品德, 张放, 张师本, 卢远征, 邓胜徽. 2007. 塔里木盆地亚科瑞克剖面奥陶系牙形石生物地层初步研究. 地质论评, 53: 242–249
赖才根. 1982a. 西藏古生代头足类新材料. 青藏高原地质文集, 7: 1–28
赖才根. 1982b. 西藏申扎奥陶纪头足类. 古生物学报, 21: 553–560
赖才根. 1982c. 中国地层5——中国的奥陶系. 北京: 地质出版社. 297
赖才根, 王明倩. 1986. 阿尔金山地区奥陶纪头足类. 古生物学报, 25: 248–259
李才, 吴彦旺, 王明, 杨韩涛. 2010a. 青藏高原泛非-早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现. 地质通报, 29: 1733–1736
李才, 程立人, 于介江, 张宝福, 翟庆国, 黄小鹏, 陈寿铭, 徐锋, 张以春. 2010b. 中华人民共和国区域地质调查报告, 比例尺1:250000, 玛依岗日幅(I45C003002). 武汉: 中国地质大学出版社. 229
李才, 解超明, 王明, 吴彦旺, 胡培远, 张修政, 徐锋, 范建军, 吴浩, 刘一鸣, 彭虎, 江庆源, 陈景文, 徐建鑫, 翟庆国, 董永胜, 张天羽, 黄小鹏. 2016. 羌塘地质. 北京: 地质出版社. 681
李善姬. 1978. 三叶虫纲. 见: 西南地质科学研究所, 主编. 西南地区古生物图册——四川分册(一). 北京: 地质出版社. 179–283
李永铁, 罗建宁, 卢辉楠, 徐文凯, 童箴言, 吴瑞忠. 2001. 青藏高原地层. 北京: 科学出版社. 542
林宝玉. 1965. 川黔地区奥陶纪珊瑚化石及其地层意义. 古生物学报, 13: 64–85
林宝玉, 邱洪荣. 1982. 西藏喜马拉雅地区古生代地层的新认识. 青藏高原地质文集, 7: 149–152
刘春晓, 杨小波, 钱利. 2009. 新疆塔中地区奥陶系地层划分与岩性研究. 地层学杂志, 33: 217–224
刘第墉. 1976. 珠穆朗玛峰地区奥陶纪腕足类. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1966–1968): 古生物(第二分册). 北京: 科学出版社. 139–158
刘第墉. 1979. 珠穆朗玛峰地区奥陶纪腕足类的新资料. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 中国登山队, 珠穆朗玛峰科学考察分队, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1975): 地质. 北京: 科学出版社. 71–75
刘世坤, 张建东, 陈挺恩. 1986. 东喀喇昆仑山奥陶纪鹦鹉螺化石新材料. 古生物学报, 25: 491–506
刘文灿, 梁定益, 王克友, 周志广, 李国彪, 张祥信. 2002. 藏南康马地区奥陶系的发现及其地质意义. 地学前缘, 9: 247–248
刘晓佳, 许志琴, 郑艺龙, 马泽良. 2019. 松潘-甘孜地体东南缘长枪穹隆核部里伍群碎屑锆石年代学和Hf同位素特征及其构造意义. 岩石学报, 35: 1695–1716
卢衍豪, 朱兆玲, 钱义元, 周志毅, 陈均远, 刘耕武, 余汶, 陈旭, 许汉奎. 1976. 中国奥陶纪的生物地层和古动物地理. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 7: 1–83
罗惠麟. 1974. 三叶虫纲. 见: 云南省地质局, 主编. 云南化石图册(上册). 昆明: 云南人民出版社. 595–694
罗惠麟, 周志毅, 胡世学, 詹冬琴, 卢玉喜. 2014. 滇东奥陶纪三叶虫序列. 古生物学报, 53: 146–171
倪寓南, 许汉奎, 陈挺恩. 1981. 西藏申扎地区奥陶系与志留系的分界. 地层学杂志, 5: 146–147
倪寓南, 陈挺恩, 周志毅, 林焕令, 耿良玉, 穆道成. 1983. 云南西部奥陶系与志留系的分界. 见: 中国科学院高原综合科学考察队, 主编. 青藏高原研究: 横断山考察专集(一). 昆明: 云南人民出版社. 43–47
聂泽同. 1990. 阿里地区古生代地层及生物群. 见: 杨遵仪, 聂泽同, 等, 主编. 西藏阿里古生物. 武汉: 中国地质大学出版社. 17–19
潘裕生, 陈挺恩. 1998. 第四节原特提斯. 见: 潘裕生, 孔祥儒, 主编. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学. 广州: 广东科技出版社. 204–211
彭善池, 朱茂炎, 张元动, 王怿. 2009. 中国早古生代海相地层研究. 中国石油化工股份有限公司海相前瞻性研究项目报告. 474
钱义元. 1976. 珠穆朗玛峰地区早奥陶世两种三叶虫. 见: 中国科学院西藏科学考察队, 主编. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966–1968): 古生物(第二分册). 北京: 科学出版社. 137–138
青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社. 662
曲新国. 1986. 北祁连山晚奥陶世晚期三叶虫. 古生物学报, 25: 301–306
盛莘夫. 1974. 滇西奥陶纪三叶虫及其划分地层之意义. 见: 盛莘夫, 主编. 中国奥陶系划分和对比. 北京: 地质出版社. 96–140
四川省地质局区域地质调查队, 中国科学院南京地质古生物研究所. 1982a. 川西藏东地区地层与古生物(第一册). 成都: 四川人民出版社. 341
四川省地质局区域地质调查队, 中国科学院南京地质古生物研究所. 1982b. 川西藏东地区地层与古生物(第二册). 成都: 四川人民出

版社. 322
四川省地质局区域地质调查队, 中国科学院南京地质古生物研究所. 1984. 川西藏东地区地层与古生物(第三册). 成都: 四川人民出版社. 249
四川省地质局区域地质调查队, 中国科学院南京地质古生物研究所. 1985. 川西藏东地区地层与古生物(第四册). 成都: 四川人民出版社. 291
宋佳祺. 2023. 西藏地区奥陶纪的头足类动物群. 学士学位论文. 长沙: 中南大学. 1–67
唐鹏, 黄冰, 吴荣昌, 樊隽轩, 燕燮, 王光旭, 刘建波, 王怿, 詹仁斌, 戎嘉余. 2017. 论上扬子区上奥陶统大渡河组. 地层学杂志, 41: 119–133
田振东, 冷成彪, 郭剑衡, 张兴春, 田丰, 马荣林. 2023. 藏东义敦地体早古生代构造格局: 来自碎屑锆石U-Pb-Hf同位素的约束. 地质学报, 97: 1088–1105
汪啸风, 陈孝红. 2005. 中国各地质时代地层划分与对比. 北京: 地质出版社. 596
汪啸风, 陈旭, 陈孝红, 朱慈英. 1996. 中国地层典: 奥陶系. 北京: 地质出版社. 126
王光旭, 梁艳, 魏鑫, 吴荣昌, 唐鹏, 栾晓聪, 崔雨浓. 2021. 扬子台地西缘奥陶纪岩石地层单位命名问题: 回顾与澄清. 地层学杂志, 45: 514–531
王光旭, 梁艳, 龚方怡, 吴荣昌, 崔雨浓, 张一驰, 魏鑫, 栾晓聪, 詹仁斌. 2022a. 扬子台地西南缘奥陶纪达瑞威尔期-桑比期地层划分对比与古地理地层学杂志, 46: 118–137
王光旭, 崔雨浓, 张竹桐, 吴荣昌, 魏鑫, 梁艳, 栾晓聪, 唐鹏, 詹仁斌. 2022b. 扬子台地西缘晚奥陶世凯迪早期地层划分对比与古地理. 地层学杂志, 46: 255–270
王光旭, 崔雨浓, 魏鑫, 吴荣昌, 张竹桐, 王骞, 詹仁斌. 2022c. 扬子台地西缘晚奥陶世凯迪晚期地层划分对比与古地理. 地层学杂志, 46: 325–345
王明倩. 1981. 头足纲. 见: 新疆地质局区域地质调查大队, 新疆地质局地质科学研究所, 新疆石油局地质调查处, 主编. 西北地区古生物图册新疆维吾尔自治区分册(一). 北京: 地质出版社. 115–134
王义刚. 1974. 奥陶系和志留系. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1966–1968): 地质. 北京: 地质出版社. 24–47
王玉净, 成俊峰, 张元动. 2008. 新疆库鲁克塔格地区中奥陶统黑土凹组的放射虫新属种. 古生物学报, 47: 393–404
王志浩, 周天荣. 1998. 塔里木西部与东北部奥陶系的牙形刺及其意义. 古生物学报, 37: 39–40
王志浩, 张智礼, 吴荣昌, 甄勇毅, 张元动, 李慧莉. 2017. 新疆塔里木板块台地和斜坡相区奥陶系牙形刺生物地层——揭示沉积间断和大坪阶地层之缺失. 地层学杂志, 41: 357–367
文世宣, 孙东立, 尹集祥, 陈挺恩, 罗辉. 1998. 喀喇昆仑-昆仑地区地层概况. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 喀喇昆仑山-昆仑山地区古生物. 北京: 科学出版社. 5–14
吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36: 1627–1674
新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 841
许汉奎, 孙东力. 1998. 喀喇昆仑地区早奥陶世扬子型腕足动物群的发现及其意义. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 喀喇昆仑山-昆仑山地区古生物. 北京: 科学出版社. 145–162
许志琴, 杨经绥, 李化启, 王瑞瑞, 蔡志慧. 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制. 岩石学报, 28: 1697–1709
杨家驎. 1990. 阿里高喜马拉雅奥陶纪三叶虫. 见: 杨遵仪, 聂泽同, 等, 主编. 西藏阿里古生物. 武汉: 中国地质大学出版社. 23–32
尹集祥. 1974. 珠穆朗玛峰地区的地层: 寒武-奥陶系. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1966–1968): 地质. 北京: 科学出版社. 4–21
尹集祥, 郭师曾. 1978. 珠穆朗玛峰及其北坡的地层. 中国科学, 1: 90–102
尹集祥, 郭师曾. 1979. 珠穆朗玛峰及其北坡的地层, 并讨论震旦-寒武系及石炭、二叠系与相邻地区的比较. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 中国登山队珠穆朗玛峰科学考察分队, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告(1975): 地质. 北京: 科学出版社. 1–70
余汶. 1961. 内蒙棹子山区早奥陶世腹足类. 古生物学报, 9: 24–140
余汶. 1975. 珠穆朗玛峰地区的腹足类化石. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 珠穆朗玛峰科学考察报告: 古生物(第一分册). 北京: 科学出版社. 129–214
余汶, 宁荟. 1983. 新疆若羌地区中奥陶世腹足类. 古生物学报, 22: 199–203
余汶, 席与华. 1995. 新疆巴楚和柯坪地区奥陶纪-泥盆纪腹足类. 古生物学报, 34: 488–494
余汶, 王惠基, 李子舜. 1963. 中国的腹足类化石. 北京: 科学出版社. 362
俞昌民. 1960. 中国晚奥陶世珊瑚化石. 古生物学报, 8: 65–102
云南省地质局第二区域地质测量队. 1975. 元阳幅F-48-7、大鹿马幅F-48-13, 1/20万区域地质调查报告. 全国地质资料馆
云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社. 728
云南省地质矿产局. 1995. 云南岩相古地理图集. 昆明: 云南科技出版社. 92
张举, 张元动, 宋妍妍. 2013. 滇东地区奥陶系红石崖组的时代. 地层学杂志, 37: 8–17
张日东. 1965. 祁连山区早奥陶世头足类化石. 古生物学报, 13: 343–357
张师本, 耿良玉, 杜品德, 唐鹏, 邓胜徽. 2007. 古生物学报, 46: 523–529
张文堂. 1962. 中国的奥陶系. 北京: 科学出版社. 161

张以春, 程立人, 张予杰. 2004. 藏北申扎地区的奥陶系. 吉林大学学报(地球科学版), 34: 502–508
张元动, 陈旭, 王志浩. 2008. 奥陶系达瑞威尔阶全球界线层型综合研究报告. 见: 第三届全国地层委员会, 主编. 中国主要断代地层建阶研究报告(2001–2005). 北京: 科学出版社. 436–454
张元动, 詹仁斌, 甄勇毅, 王志浩, 袁文伟, 方翔, 马譞, 张俊鹏. 2019. 中国奥陶纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 66–92
张元动, 詹仁斌, 王志浩, 袁文伟, 方翔, 梁艳, 燕燮, 王玉净, 梁昆, 张俊鹏, 陈挺恩, 周志强, 全胄完, 马譞, 李文杰, 武学进, 魏鑫. 2020. 中国奥陶纪地层及标准化石图集. 杭州: 浙江大学出版社. 575
张元动, 詹仁斌, 王传尚, 方翔. 2021a. 奥陶系“金钉子”. 詹仁斌, 张元动, 主编, 地层“金钉子”. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社. 99–162
张元动, 詹仁斌, 袁文伟, 唐鹏, 李越, 王志浩, 周志毅, 方翔, 李文杰, 成俊峰. 2021b. 中国奥陶纪岩石地层划分和对比. 地层学杂志, 45: 250–270
张远志. 1996. 云南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 363
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. 340
中国珠穆朗玛峰登山队科学考察队. 1962. 珠穆朗玛峰地区科学考察报告. 北京: 科学出版社. 291
钟端, 郝永祥. 1990. 塔里木盆地震旦纪至二叠纪地层古生物(I), 库鲁克塔格分册. 南京: 南京大学出版社. 252
周志广, 刘文灿, 梁定益. 2004. 藏南康马奥陶系及其底砾岩的发现并初论喜马拉雅沉积盖层与统一变质基底的关系. 地质通报, 23: 655–663
周志毅. 2001. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科学出版社. 359
周志毅, 周志强, 张进林. 1989. 华北地台及其西缘奥陶纪三叶虫相. 古生物学报, 28: 296–313
周志毅, 甄勇毅, 周志强, 袁文伟. 2009. 中国奥陶纪三叶虫生物地理. 古地理学报, 11: 69–80
周志毅, 罗惠麟, 周志强, 袁文伟. 2001. 向阳组三叶虫动物群的分布——兼论奥陶纪印支地体在滇西的地质界线. 古生物学报, 40: 310–317
邹西平. 1985. 安徽泾县上奥陶统五峰组鹦鹉螺化石. 古生物学报, 24: 605–613
Agematsu S, Oo T. 2023. Ordovician geology of the Sibumasu Block, SE Asia. Geol Soc Lond Spec Publ, 533: 519–544
Agematsu S, Sashida K, Salyapongse S, Sardsud A. 2006. Ordovician conodonts from the Thong Pha Phum area, western Thailand. J Asian Earth Sci, 26: 49–60
Agematsu S, Sashida K, Salyapongse S, Sardsud A. 2007. Ordovician conodonts from the Satun area, Southern Peninsular Thailand. J Paleontol, 81: 19–37
Agematsu S, Sashida K, Sardsud A. 2008. Reinterpretation of Early and Middle Ordovician conodonts from the Thong Pha Phum area, western Thailand, in the context of new material from western and northern Thailand. Paleontol Res, 12: 181–194
Bergström S M, Finney S C, Xu C, Pålsson C, Wang Z H, Grahn Y. 2000. A proposed global boundary stratotype for the base of the Upper Series of the Ordovician System: The Fågelsång section, Scania, southern Sweden. Episodes, 23: 102–109
Bergström S M, Löfgren A, Maletz J. 2004. The GSSP of the second (upper) stage of the Lower Ordovician series: Diabasbrottet at Hunneberg, province of Västergötland, southwestern Sweden. Episodes, 27: 265–272
Bergström S M, Saltzman M M, Schmitz B. 2006. First record of the Hirnantian (Upper Ordovician) δ^{13}C excursion in the North American Midcontinent and its regional implications. Geol Mag, 143: 657–678
Bergström S M, Eriksson M E, Young S A, Ahlberg P, Schmitz B. 2014. Hirnantian (latest Ordovician) δ^{13}C chemostratigraphy in southern Sweden and globally: A refined integration with the graptolite and conodont zone successions. GFF, 136: 355–386
Brenchley P J, Štorch P. 1989. Environmental changes in the Hirnantian (upper Ordovician) of the Prague Basin, Czechoslovakia. Geol J, 24: 165–181
Burrett C. 1973. Ordovician biogeography and continental drift. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 13: 161–201
Burrett C, Zaw K, Meffre S, Lai C K, Khositanont S, Chaodumrong P, Udchachon M, Ekins S, Halpin J. 2014. The configuration of Greater Gondwana—Evidence from LA ICPMS, U-Pb geochronology of detrital zircons from the Palaeozoic and Mesozoic of Southeast Asia and China. Gondwana Res, 26: 31–51
Burrett C, Udchachon M, Thassanapak H. 2017. Palaeozoic correlations and the palaeogeography of the Sibumasu (Shan-Thai) Terrane—A brief review. Res Knowl, 2: 1–17
Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. Earth Planet Sci Lett, 255: 70–84
Chen D, Rong J Y. 2019. A new craniid brachiopod genus from the terminal Ordovician Hirnantia fauna of Myanmar and South China. Pap Palaeontol, 5: 521–535
Chen X, Rong J Y, Wang X F, Wang Z H, Zhang Y D, Zhan R B. 1995. Correlation of the Ordovician rocks of China. IUGS Publ, 31: 1–104
Chen X, Ni Y N, Mitchell C E, Qiao X D, Zhang S G. 2000. Graptolites from the Qilang and Yingan Formations (Caradoc, Ordovician) of Kalpin, western Tarim, Xinjiang, China. J Paleontol, 74: 282–300
Chen X, Rong J Y, Fan J X, Zhan R B, Michell C E, Harper D A T, Melchin M J, Peng P A, Finney S C, Wang X F. 2006. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Hirnantian Stage (the uppermost of the Ordovician System).

Episodes, 29: 183–196

Chen X, Zhang Y D, Goldman D, Bergström S M, Fan J X, Wang Z H, Finney S C, Chen Q, Ma X. 2017. Darriwilian to Katian (Ordovician) Graptolites from Northwest China. Hangzhou: Zhejiang University Press. 354

Chen X, Chen Q, Aung K P, Muir L A. 2020. Latest Ordovician graptolites from the Mandalay Region, Myanmar. Palaeoworld, 29: 47–65

Chen Z Y, Zhang D, Zhen Y Y, Li W J, Wu R C, Chen Q, Zhao A K, Zhang Y D. 2022. Uppermost Katian (Ka4, Upper Ordovician) conodonts in South China: Biostratigraphy, biofacies, and paleobiogeography. Mar Micropaleontology, 175: 102154

Chen Z Y, Li W J, Fang X, Li C, Burrett C, Udchachon M, Zhang Y D. 2023. Ordovician conodonts from the Ban Tha Kradan area, western Thailand. Palaeoworld, doi: 10.1016/j.palwor.2022.12.004

Cocks L R M, Rong J Y. 1988. A review of the Late Ordovician *Foliomena* brachiopod fauna with new data from China, Wales, and Poland. Palaeontology, 31: 53–67

Cocks L R M, Fortey R A. 1997. A new Hirnantia fauna from Thailand and the biogeography of the latest Ordovician of south-east Asia. Geobios, 30: 117–126

Cocks L R M, Fortey R A. 2002. The palaeogeographical significance of the latest Ordovician fauna from the Panghsa-pye Formation of Burma (Myanmar). Spec Pap Palaeontol, 67: 57–76

Cocks L R M, Torsvik T H. 2021. Ordovician palaeogeography and climate change. Gondwana Res, 100: 53–72

Cocks L R M, Fortey R A, Lee C P. 2005. A review of Lower and Middle Palaeozoic biostratigraphy in west peninsular Malaysia and southern Thailand in its context within the Sibumasu Terrane. J Asian Earth Sci, 24: 703–717

Cooper R A, Nowlan G S, Williams S H. 2001. Global stratotype section and point for base of the Ordovician system. Episodes, 24: 19–28

Cui Y N, Wang G X. 2021. Revision of late Katian (Late Ordovician) heliolitine corals from Northern Kuruktag in northeastern Tarim Basin of China. Alcheringa, 45: 178–194

Droser M L, Sheehan P M, Fortey R A, Li X. 1995. The nature of diversification and paleoecology of the Ordovician radiation with evidence from the Great Basin. In: Cooper J D, Droser M L, Finney S C, eds. Ordovician Odyssey: Short Papers for the Seventh International Symposium on the Ordovician System. California: SEPM. 405–408

Ebbestad J O R, Frýda J, Wagner P J, Horný R J, Isakar M, Stewart S, Percival I G, Bertero V, Rohr D M, Peel J S, Blodgett R B, Högström A E S. 2013. Biogeography of Ordovician and Silurian gastropods, monoplacophorans and mimospirids. Geol Soc Lond Mem, 38: 199–220

Fang X, Ma X, Li W J, Zhang Y D, Zhou Z Q, Chen T E, Lü Y, Yu S Y, Fan J X. 2018a. Biostratigraphical constraints on the disconformity within the Upper Ordovician in the Baoshan and Mangshi regions, western Yunnan Province, China. Lethaia, 51: 312–323

Fang X, Chen T, Burrett C, Wang Y, Qu Y, Zheng C, Zhang Y, Zhang Y, Li W. 2018b. Middle Ordovician actinocerid nautiloids (Cephalopoda) from Xainza County, Tibet, western China, and their paleogeographic implications. J Paleontol, 92: 398–411

Fang X, Burrett C, Li W J, Zhang Y B, Zhang Y D, Chen T E, Wu X J. 2019. Dynamic variation of Middle to Late Ordovician cephalopod provincialism in the northeastern peri-Gondwana region and its implications. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 521: 127–137

Fang X, Li C, Li W J, Burrett C, Udchachon M, Zhang Y D. 2021. *Sinoceras chinense* (Foord, 1888) in western Thailand: First identification outside China. Palaeoworld, 30: 278–285

Fortey R A, Cocks L R M. 1998. Biogeography and palaeogeography of the Sibumasu terrane in the Ordovician: A review. In: Hall R, Holloway J D, eds. Biogeography and Geological Evolution of SE Asia. Leiden: Backhuys Publishers. 43–56

Garzanti E, Casnedi R, Jadoul F. 1986. Sedimentary evidence of a Cambro-Ordovician orogenic event in the northwestern Himalaya. Sediment Geol, 48: 237–265

Gehrels G E, DeCelles P G, Ojha T P, Upreti B N. 2006. Geologic and U-Th-Pb geochronologic evidence for early Paleozoic tectonism in the Kathmandu thrust sheet, central Nepal Himalaya. Geol Soc Am Bull, 118: 185–198

Ghobadi Pour M, Popov L E. 2023. The Ordovician of the Middle East (Iran, Afghanistan, Pakistan). Geol Soc Lond Spec Publ, 533: 279–312

Goldman D, Leslie S A, Nõlvak J, Young S, Bergström S M, Huff W D. 2007. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Katian Stage of the Upper Ordovician Series at Black Knob Ridge, Southeastern Oklahoma, USA. Episodes, 30: 258–270

Greenfield J E, Gilmore P J, Mills K J. 2010. Explanatory notes for the Koonenberry Belt geological maps. Geol Surv NSW Bull, 35: 1–528

Han Z R, Yang Z Y, Tong Y B, Jing X Q. 2015. New paleomagnetic results from Late Ordovician rocks of the Yangtze Block, South China, and their paleogeographic implications. J Geophys Res-Solid Earth, 120: 4759–4772

Harper D A T, Zhan R B, Stemmerik L, Liu J B, Donovan S K, Stouge S. 2011. Ordovician on the roof of the world: Macro- and microfaunas from tropical carbonates in Tibet. In: Gutiérrez-Marco J C, Rábano I, García-Bellido D, eds. Ordovician of the World. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 215–220

Hashimoto T, Bailey A, Chirinos A. 2018. Onshore basin inventory

volume 2: The Canning, Perth and Officer Basins. Geosci Aust, 18: 1–123

Hu P, Li C, Wang M, Xie C, Wu Y. 2013. Cambrian volcanism in the Lhasa terrane, southern Tibet: Record of an early Paleozoic Andean-type magmatic arc along the Gondwana proto-Tethyan margin. J Asian Earth Sci, 77: 91–107

Huang B, Zhou H H, Harper D A T, Zhan R B, Zhang X L, Chen D, Rong J Y. 2020. A latest Ordovician *Hirnantia* brachiopod fauna from western Yunnan, Southwest China and its paleobiogeographic significance. Palaeoworld, 29: 31–46

Hughes N C, Myrow P M, McKenzie N R, Harper D A T, Bhargava O N, Tangri S K, Ghalley K S, Fanning C M. 2006. Cambrian rocks and faunas of the Wachi La, Black Mountains, Bhutan. Geol Mag, 148: 351–379

Jing X C, Deng S H, Zhao Z J, Lu Y Z, Zhang S B. 2008. Carbon isotope composition and correlation across the Cambrian-Ordovician boundary in Kalpin Region of the Tarim Basin, China. Sci China Ser D-Earth Sci, 51: 1317–1329

Kobayashi T, Hamada T. 1964. On the Middle Ordovician fossils from Satun, the Malaysian Frontier of Thailand. Jap J Geol Geogr, 35: 205–211

Kröner A, Stern R J. 2004. Pan-African Orogeny. Encyclopedia Geol, 1: 1–12

Lee J S, Chao Y T. 1924. Geology of the gorge district of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the Gorges. Bull Geol Soc China, 3: 351–392

Li C, Zhang Y D. 2020. Ordovician carbon isotope stratigraphy of China: A synthesis. Stratigr Timescal, 5: 353–386

Li H S. 1995. New genera and species of Middle Ordovician *Nassellaria* and *Albaillellaria* from Baijingsi, Qilian Mountains, China. Sci Geol Sin, 4: 331–346

Li S Z, Zhao S J, Liu X, Cao H H, Yu S, Li X Y, Someville I, Yu S Y, Suo Y H. 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia. Earth-Sci Rev, 186: 37–75

Li W J, Fang X, Yu S Y, Burrett C, Zhen Y Y, Huang J Y, Zhang Y D. 2023. Middle Ordovician shallow-water gastropods from southern Xizang (Tibet), China. Palaeoworld, doi: 10.1016/j.palwor.2022.08.003

Liang Y, Wang G X, Servais T, Wu R C, Nõlvak J, Hints O, Wei X, Gong F Y, Yan G Z. 2020. Age constraints of the Hungshihyen Formation (Early to Middle Ordovician) on the western margin of the Yangtze Platform, South China: New insights from chitinozoans. Palaeoworld, 29: 66–74

Liang Y, Tang P, Wang G X, Yan G Z, Wang Q. 2023. Middle-Late Ordovician chitinozoans from Songliang of Qiaojia, western South China, and their biostratigraphic implications. Palaeoworld, 32: 287–302

Liu C G, Qi L X, Liu Y L, Luo M X, Shao X M, Luo P, Zhang Z L. 2016. Positive carbon isotope excursions: Global correlation and genesis in the Middle-Upper Ordovician in the northern Tarim Basin, Northwest China. Pet Sci, 13: 192–203

Liu F, Dong Y, Liu C. 2015. The Precambrian geology of the Tibetan Plateau. In: Zhai M G, ed. Precambrian Geology of China. Heidelberg: Springer. 353–384

Metcalfe I. 2011. Tectonic framework and Phanerozoic evolution of Sundaland. Gondwana Res, 19: 3–21

Metcalfe I. 2021. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia. Gondwana Res, 100: 87–130

Miller J F, Evans K R, Ethington R L, Freeman R L, Loch J D, Repetski J E, Ripperdan R L, Taylor J F. 2015. Proposed auxiliary boundary stratigraphic section and point (ASSP) for the base of the Ordovician System at Lawson Cove, Utah, USA. Stratigraphy, 12: 219–236

Mitchell C E, Chen X, Bergström S M, Zhang Y D, Wang Z H, Webby B D, Finney S C. 1997. Definition of a global boundary stratotype for the Darriwilian Stage of the Ordovician System. Episodes, 20: 158–166

Mu E Z, Ni Y D. 1983. Uppermost Ordovician and lowermost Silurian graptolites from the Xainza area of Xizang (Tibet) with discussion on the Ordovician-Silurian boundary. Palaeontol Cathayana, 1: 155–179

Myrow P M, Hughes N C, Searle M P, Fanning C M, Peng S C, Parcha S K. 2009. Stratigraphic correlation of Cambrian-Ordovician deposits along the Himalaya: Implications for the age and nature of rocks in the Mount Everest region. Geol Soc Am Bull, 121: 323–332

Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, Fanning C M, Williams I S, Peng S C, Bhargava O N, Parcha S K, Pogue K R. 2010. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian-Ordovician. Geol Soc Am Bull, 122: 1660–1670

Myrow P M, Hughes N C, McKenzie N R, Pelgay P, Thomson T J, Haddad E E, Fanning C M. 2016. Cambrian-Ordovician orogenesis in Himalayan equatorial Gondwana. Geol Soc Am Bull, 128: 1679–1695

Myrow P M, Hughes N C, McKenzie N R. 2018. Reconstructing the Himalayan margin prior to collision with Asia: Proterozoic and lower Paleozoic geology and its implications for Cenozoic tectonics. Geol Soc Lond Spec Publ, 483: 39–64

Myrow P M, Hughes N C, Singh B P. 2023. Ordovician strata of the Indian subcontinent. Geol Soc Lond Spec Publ, 533: 397–419

Niko S, Sone M. 2014. Actinocerid Cephalopods from the Ordovician of Myanmar, and their paleobiogeographic implications for Northern Gondwana. Paleontol Res, 18: 94–103

Reed F R C. 1917. Ordovician and Silurian fossils from the Yun-Nan. Mem Geol Surv India, 6: 1–68

Reed F R C. 1934. Cambrian and Ordovician fossils from Kashmir. Palaeontol Ind, 21: 1–38

Rohr D M. 1980. Ordovician-Devonian Gastropoda from the Klamath Mountains, California. Palaeontogr Abt A, 171: 141–199

Rong J Y, Zhan R B, Harper D A T. 1999. Late Ordovician (Caradoc-Ashgill) Brachiopod Faunas with *Foliomena* Based on Data from China. Palaios, 14: 412–431

Rong J Y, Harper D A T, Huang B, Li R Y, Zhang X L, Chen D. 2020a. The latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas: New global insights. Earth-Sci Rev, 208: 103280

Rong J Y, Aung K P, Zhan R B, Huang B, Harper D A T, Chen D, Zhou H H, Zhang X L. 2020b. The latest Ordovician *Hirnantia* brachiopod fauna of Myanmar: Significance of new data from the Mandalay Region. Palaeoworld, 29: 1–30

Scotese C R. 2014. Atlas of Silurian and Middle-Late Ordovician paleogeographic maps (Mollweide Projection), Maps 73–80, Volume 5. The Early Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project. Evanston, IL

Scotese C R. 2021. An Atlas of Phanerozoic paleogeographic maps: The seas come in and the seas go out. Annu Rev Earth Planet Sci, 49: 679–728

Servais T, Harper D A T, Kröger B, Scotese C, Stigall A L, Zhen Y Y. 2023. Changing palaeobiogeography during the Ordovician Period. Geol Soc Lond Spec Publ, 532: 111–136

Shabbar H, Saxena A, Tinn O, Gupta S, Singh K J. 2023. Non-calcified warm-water marine macroalgae from the Ordovician strata of Spiti, Tethys Himalaya, India. Palaeoworld, 32: 396–410

Shaw R D, Sexton M J, Zeilinger I. 1994. The tectonic framework of the Canning Basin, W.A., including the 1:2 million structural elements map of the Canning Basin. Aust Geol Surv Organ, 48: 1–89

Stait B, Burrett C. 1984. Early ordovician polyplacophoran *Chelodes whitehousei* from Tarutao Island, southern Thailand. Alcheringa-Australas J Palaeontol, 8: 112

Torsvik T H, Cocks L R M. 2013. New global palaeogeographical reconstructions for the Early Palaeozoic and their generation. Geol Soc Lond Mem, 38: 5–24

Torsvik T H, Cocks L R M. 2017. Earth History and Palaeogeography. Cambridge: Cambridge University Press. 317

Tran T V, Faure M, Nguyen V V, Bui H H, Fyhn M B W, Nguyen T Q, Lepvrier C, Thomsen T B, Tani K, Charusiri P. 2020. Neoproterozoic to Early Triassic tectono-stratigraphic evolution of Indochina and adjacent areas: A review with new data. J Asian Earth Sci, 191: 104231

Wang G X, Cui Y N, Liang Y, Wu R C, Wei X, Gong F Y, Huang B, Luan X C, Tang P, Li L X, Zhang X L, Zhang Y C, Zhang Z T, Wang Q, Zhan R B. 2023. Toward a unified and refined Ordovician stratigraphy for the western Yangtze region, South China. Palaeoworld, 32: 202–218

Wang H Z, Chen J Q. 1991. Late Ordovician and early Silurian rugose coral biogeography and world reconstruction of palaeocontinents. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 86: 3–21

Wang W H, Zhao R, Muir L A, Li M, Tan J Q. 2018. Darriwilian (Middle Ordovician) chitinozoans from the Qaidam Paleoplate, northwest China. Rev Palaeobot Palynol, 259: 123–133

Wang W H, Gao S J, Servais T, Singh B P, Myrow P. 2021. Preliminary palynological study of the Upper Ordovician Pin Formation in northern Indian Himalaya. Palynology, 45: 301–319

Wang X F, Stouge S, Chen X H, Li Z H, Wang C S, Finney S C, Zeng Q L, Zhou Z Q, Chen H M, Erdtmann B D. 2009. The Global Stratotype Section and Point for the base of the Middle Ordovician Series and the Third Stage (Dapingian). Episodes, 32: 96–113

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

Wang Z H, Zhen Y Y, Bergström S M, Wu R C, Zhang Y D, Ma X. 2019. A new conodont biozone classification of the Ordovician System in South China. Palaeoworld, 28: 173–186

Wongwanich T, Burrett C F, Chaodumrong P, Tansathein W. 1990. Lower to Mid Palaeozoic stratigraphy of mainland Satun province, southern Thailand. J Southeast Asian Earth Sci, 4: 1–9

Yan Z, Xiao W J, Aitchison J C, Yuan C, Liu C Z, Fu C L. 2021. Age and origin of accreted ocean plate stratigraphy in the North Qilian belt, NE Tibet Plateau: Evidence from microfossils and geochemistry of cherts and siltstones. J Geol Soc, 178: jgs2020-231

Yu S Y, Fang X, Munnecke A, Li W J, Zhen Y Y, Li Y, Wang Z H, Zhang Y D. 2019. First documentation of Middle Ordovician warm-water carbonates in the Mount Jolmo Lungma (Mount Everest) area, southern Xizang (Tibet), China, and its paleogeographic implications. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 530: 136–151

Yu S Y, Fang X, Zhang Y D, Zhen Y Y, Li W J, Li Y, Munnecke A. 2021. First record of the Middle Darriwilian $\delta^{13}C$ excursion (MDICE) in southern Xizang (Tibet), China, and its implications. Carbonates Evaporites, 36: 33

Yuan T, Yi H S, Zhang S, Cai Z H, Li G J. 2018. Carbon isotope excursions and Paleo-Oceanography of the Ordovician-Silurian

boundary carbonate rocks from the Xainza Area, Tibet. Acta Geol Sin-Engl Ed, 92: 2052–2054

Zhan R B, Harper D A T, Jin J S, Liang Y, Liu J B, Stemmerik L, Stouge S. 2014a. Middle Ordovician *Aporthophyla* brachiopod fauna from the roof of the world, southern Tibet. Palaeontology, 57: 141–170

Zhan R B, Rong J Y, Jin J S, Liang Y, Yuan W W, Zhang Y D, Wang Y. 2014b. Discovery of a Late Ordovician *Foliomena* fauna in the Tarim desert, Northwest China. Palaeoworld, 23: 125–142

Zhan R B, Huang B, Wang G X, Jin J S, Liang Y, Wang Y, Zhang Y D, Li R Y, Liu J B, Wu R C. 2014c. Discovery of the late Middle Ordovician *Saucrorthis* fauna (Brachiopoda) from the Sibumasu palaeoplate, western Yunnan, SW China. GFF, 136: 320–326

Zhang Y D, Munnecke A. 2016. Ordovician stable carbon isotope stratigraphy in the Tarim Basin, NW China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 458: 154–175

Zhang Y D, Fan J X, Erdtmann B D, Liu X. 2009a. Darriwilian graptolites of the Shihtien Formation (Ordovician) in west Yunnan, China. Alcheringa-Australas J Palaeontol, 33: 303–329

Zhang Y D, Fan J X, Liu X. 2009b. Graptolite biostratigraphy of the Shihtien Formation (Darriwilian) in West Yunnan, China. Bull Geosci, 84: 35–40

Zhang Y D, Wang Y, Zhan R B, Fan J X, Zhou Z Q, Fang X. 2014. Ordovician and Silurian Stratigraphy and Palaeontology of Yunnan, Southwest China. Beijing: Science Press. 138

Zhang Y D, Zhan R B, Zhen Y Y, Wang W H, Liang Y, Fang X, Wu R C, Yan K, Zhang J P, Li W J. 2023. Regional synthesis of the Ordovician geology and stratigraphy of China. Geol Soc Lond Spec Publ, 533: 421–478

Zhang Y Y, Li Y, Munnecke A. 2014. Late Ordovician microbial reefs in the Lianglitag Formation (Bachu, Tarim, NW China). Facies, 60: 663–684

Zhang Y Y, Li Y, Wang G, Munnecke A. 2017. Windward and leeward margins of an Upper Ordovician carbonate platform in the Central Tarim Uplift, Xinjiang, northwestern China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 474: 79–88

Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. Earth-Sci Rev, 186: 262–286

Zhao Z J, Wang J G, Wang P X. 2017. Carbon and oxygen isotope variation and its implication for marine sequence: A case study of Ordovician in Tarim Basin. Pet Res, 2: 281–290

Zhen Y Y, Nicoll R S. 2009. Biogeographic and biostratigraphic implications of the *Serratognathus bilobatus* fauna (Conodonta) from the Emanuel Formation (Early Ordovician) of the Canning Basin, Western Australia. Rec Aust Mus, 61: 1–30

Zhen Y Y, Zhang Y D, Percival I G. 2009. Early Ordovician (Floian) *Serratognathidae* fam. nov. (Conodonta) from Eastern Gondwana: Phylogeny, biogeography and biostratigraphic applications. Mem Asso Aust Palaeontol, 37: 669–686

Zhen Y Y, Wang Z H, Zhang Y D, Bergström S M, Percival I G, Cheng J F. 2011. Middle to Late Ordovician (Darriwilian-Sandbian) conodonts from the Dawangou section, Kalpin area of the Tarim Basin, northwestern China. Rec Aust Mus, 63: 203–266

Zhen Y Y, Zhang Y, Wang Z, Percival I G. 2016. Huaiyuan epeirogeny—Shaping Ordovician stratigraphy and sedimentation on the North China Platform. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 363–370

Zhen Y Y, Percival I G, Woo J, Park T Y S. 2019. Latest Cambrian-earliest Ordovician conodonts and microbrachiopods from northern Victoria Land, Antarctica: Handler Ridge revisited. Palaeoworld, 28: 13–23

Zhen Y Y, Zhang Y D, Harper D A T, Zhan R B, Fang X, Wang Z H, Yu S Y, Li W J. 2020. Ordovician successions in southern-central Xizang (Tibet), China—Refining the stratigraphy of the Himalayan and Lhasa terranes. Gondwana Res, 83: 372–389

Zhou Z Y, Dean W T, Luo H L. 1998. Early Ordovician trilobites from Dali, West Yunnan, China, and their palaeogeographical significance. Palaeontology, 41: 429–460

(责任编委: 朱茂炎)