中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 4 期: 1026 ~ 1057
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

青藏高原及其周边志留纪综合地层、生物群与古地理演化

陈中阳[1,2*], 陈清[1,2], 王光旭[1,2], 方翔[1,2], 唐鹏[1,2], 闫冠州[1], 袁文伟[1], 黄冰[1,2], 张小乐[1], 燕燮[1,2], 张元动[1,2], 王怿[1,2]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院大学, 北京 100049
* 通讯作者, E-mail: zychen@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2023-02-06; 收修改稿日期: 2023-10-06; 接受日期: 2023-11-30; 网络版发表日期: 2024-02-07
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: 41972162、42102013、42272007、42302029)和江苏省青年基金项目(编号: BK20210992)资助

摘要 青藏高原志留纪的古生物学与地层学研究已有百余年的历史, 随着第二次青藏高原综合科学考察研究项目的启动, 对于青藏高原志留纪的地层系统和化石群的总结, 及其与周边地区的对比亟待更新. 本文在青藏高原及其周边选择了33条代表剖面, 从地层区划、岩石地层、年代地层和生物地层等方面, 对已有的资料进行了总结, 将青藏高原及其周边划为了4个地层区: 西藏-滇西-川西地层区、昆仑-祁连地层区、华南地层区和塔里木地层区. 其中青藏高原主体部分被划入了西藏-滇西-川西地层区, 该地层区地层和生物组合发育基本完整, 一定程度上弥补了我国其他地区志留系研究的不足. 通过对志留纪青藏高原及其周边古生物地理研究的总结, 尤其是对鱼类动物群、孢型植物组合和腕足动物群分布特征的梳理, 指出华南、塔里木和印支等三大板块之间的关系应该比此前认为的更为密切. 与研究程度较高的周边地区相比, 青藏高原主体部分的志留系尚处于初步研究阶段, 诸多问题和领域有待开展和深入研究. 未来需要对志留系底部黑色岩系的时限、分布和资源量进行研究, 为我国未来页岩气勘探开发提供新的方向. 志留系中-上部浅海地层需要进行进一步的划分. 由于青藏高原地区的志留系发育较完整, 在生物地层学工作基础上, 更有潜力补充和完善我国志留纪的碳同位素地层学研究.

关键词 青藏高原, 志留纪, 地层区划, 岩石地层, 生物地层, 古地理演化

1 引言

青藏高原位于我国西南部, 西起帕米尔高原和兴都库什山, 东到横断山脉, 北起昆仑山和祁连山, 南至喜马拉雅山区, 主体平均海拔超过4000m, 是地球上最年轻、海拔最高、面积最大的高原, 被誉为“世界屋脊”“亚洲水塔”和“地球第三极”(姚檀栋等, 2017, 2019, 2021). 青藏高原广泛发育沉积岩, 各时代地层出露齐

中文引用格式: 陈中阳, 陈清, 王光旭, 方翔, 唐鹏, 闫冠州, 袁文伟, 黄冰, 张小乐, 燕燮, 张元动, 王怿. 2024. 青藏高原及其周边志留纪综合地层、生物群与古地理演化. 中国科学: 地球科学, 54(4): 1026–1057, doi: 10.1360/SSTe-2023-0022
英文引用格式: Chen Z, Chen Q, Wang G, Fang X, Tang P, Yan G, Yuan W, Huang B, Zhang X, Yan K, Zhang Y, Wang Y. 2024. Silurian integrative stratigraphy, biotas, and paleogeographical evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas. Science China Earth Sciences, 67(4): 1005–1035, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1235-3

© 2024 《中国科学》杂志社

全, 具有巨大的石油天然气资源潜力(赵政璋等, 2001).

青藏高原志留纪的生物学与地层学研究始于20世纪初. 西方学者对位于横断山区的施甸盆地进行了地质考察, 并报道了其中志留纪的笔石(Brown, 1913; Reed, 1917). 随后直至20世纪60年代初期, 我国学者陆续在横断山区和祁连山区开展了艰苦卓绝的、开创性的工作, 揭开了我国学者对于青藏高原志留系研究的序幕(Yin和Lu, 1937; Sun和Szetu, 1947; 尹赞勋和王尚文, 1948; 郭勇岭和甘克文, 1958; Mu, 1963; 中国科学院地质研究所等, 1963; 穆恩之和张有魁, 1964). 从20世纪60年代后期起, 我国陆续组织了第一次青藏高原综合科学考察(简称"第一次青藏科考")和若干次局部地区的地质科学考察和填图工作, 对青藏高原的志留系展开了系统的研究工作. 1966~1968年, 中国科学院主持了西藏南部珠穆朗玛峰地区的科学考察, 在该地区首次发现了志留系(穆恩之等, 1973; 王义刚, 1974), 而后该地区的志留系地层框架不断得以修订(林宝玉和邱洪荣, 1982, 1983; 穆恩之和陈挺恩, 1984; 杨曾荣, 1985; 林宝玉, 1989). 西藏北部班戈地区的志留系由西藏地质局第四地质大队综合研究队填图组在工作中发现(梁寿生和夏金宝, 1978). 西藏北部申扎地区的志留系最早由西藏地质局综合普查大队(1980)发现并报道, 随后中国地质科学院地质研究所和中国科学院南京地质古生物研究所先后对申扎地区的志留系进行了调查, 建立了该地区志留系的地层框架(林宝玉, 1981, 1983; 许汉奎等, 1981; 林宝玉和邱洪荣, 1983; 倪寓南, 1986; 张树岐等, 2003; 郑春子, 2005). 基于区域地质调查的结果, 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(1982)在四川西部和西藏东部首次建立了相对完整的志留系的地层序列和系统. 西藏北部拉竹龙地区的志留系中的腕足类最早于1984年报道(章炳高和何国雄, 1984; 董得源, 1984), 而该地区志留系的地层框架最终由陈挺恩和张允白(2010)整理、厘定并发表. 在这些研究的基础上, 一系列关于青藏高原地层系统的综合研究成果得以发表(徐宪等, 1982; 文世宣等, 1984; 西藏自治区地质矿产局, 1993; 夏代祥和刘世坤, 1997; 赵政璋等, 2001; 王立全等, 2013; 计文化等, 2014), 对青藏高原的地层、生物和构造-岩相古地理等各方面进行了系统梳理, 逐步建立起青藏高原志留系的地层框架.

目前青藏高原的志留纪地层系统和生物群的总结, 以及其与周边地区的对比, 大多基于以"第一次青藏科考"为代表的地质科学考察的研究结果. 然而, 青藏高原的志留纪地层系统和化石群的总结, 以及其与周边地区的对比, 尚存在一些问题: (1) 一些化石类群, 尤其是牙形刺的分类方案发生了变革, 过去在青藏高原及其周边鉴定的牙形刺属种, 乃至牙形刺生物地层单元均需要进行厘定, 而牙形刺作为志留纪地层划分和对比的第二门类, 这样的厘定会涉及到对地层时代界定的调整; (2) 国际地层委员会于1984年批准通过了志留系分会提出的"四分"方案(Bassett, 1985; Holland, 1985), 因此, 青藏高原的地层划分及其与全球地层标准的对比需要厘定; (3) 随着近年来周边地区志留系研究的不断深入, 以华南和塔里木两大板块为主的志留系划分已经发生了较大的变化, 导致青藏高原与其周边地区的对比需要进行调整; (4) 以西藏南部珠穆朗玛峰地区为代表的部分地区志留系岩石地层单元的命名较为混乱.

第二次青藏高原综合科学考察研究(简称"第二次青藏科考")于2017年启动, 其中一项任务是通过对青藏高原关键地区关键时段深时地层和古生物研究, 恢复各地块之间的相对空间对比关系, 结合大陆拼合过程研究, 构建高原早期演化过程. 自"第二次青藏科考"启动以来, 青藏高原志留系的研究不断有新的成果产出. 李明等(2019)系统研究了西藏志留系的海相红层, 并将其与扬子区志留系的海相红层进行了对比. Chen等(2020, 2022)通过对云南保山和西藏聂拉木的志留纪牙形刺的系统研究, 更新了横断山区南部和珠穆朗玛峰地区的志留纪牙形刺生物地层框架. 张予杰等(2021)对青藏高原中南部的前寒武系及古生界岩石地层的组成和时代进行分析, 梳理了包含志留系在内的地层划分对比中存在的问题. Song等(2022)通过对西藏聂拉木的志留纪介形类的研究及其与同期其他地区介形类的对比, 提出地理隔离和全球海平面变化是影响志留纪介形类地理分布的主要因素. 这些新的研究为青藏高原及其周边的志留系研究提供了新的材料. 本文基于这些新材料, 结合前人的认识, 从综合地层、古地理特征及重大地质事件等多个方面, 对青藏高原及其周边的志留系研究进行总结.

2　青藏高原及其周边地区志留系综合地层

本文将依据青藏高原及其周边地区志留系的已有

资料和最新研究成果, 从地层区划、岩石地层、年代地层和生物地层方面进行综合论述.

2.1 地层区划和岩石地层

青藏高原及其周边的地层区划最早由徐宪等(1982)制定, 在随后的研究中不断地得到修订(文世宣等, 1984; 赵政璋等, 2001; 王立全等, 2013; 计文化等, 2014). 同时, 针对中国志留系地层区划, 也陆续有新的研究成果产出(陈旭和戎嘉余, 1988; 林宝玉等, 1998; 汪啸风和陈孝红, 2005; 王怿等, 2021). 本文在综合上述研究的基础上, 结合戎嘉余等(2019)总结的中国主要板块位置, 对青藏高原及其周边志留系地层区划进行了厘定(图1), 遴选出中国的24条代表剖面, 外加毗邻的南亚和东南亚诸国的9条代表剖面, 开展志留系地层区划和岩石地层的研究.

2.1.1 中国青藏高原及其周边地层区划和岩石地层

前人在构造-地层区划的研究中往往根据拉萨地块与南羌塘地块之间的缝合带, 将青藏高原划分为羌塘-三江和冈底斯-喜马拉雅两个地层大区(王立全等, 2013; 计文化等, 2014). 然而, 这条缝合带, 即班公湖-怒江缝合带, 代表的是形成于二叠纪早期的中特提斯洋(Metcalfe, 2021), 并不能指示这两个地层大区在志留纪就已经被大洋相隔. 因此, 在进行志留纪地层问题的讨论时, 继续沿用这两个地层大区的方案稍显不妥. 事实上, 在南羌塘地块和北羌塘地块之间, 位于奥依塔格-库地缝合带(Mattern和Schneider, 2000)和蚂蚁堆-湾河缝合带(Liu等, 2021)之间, 存在一条缝合带, 代表着于元古代晚期打开而在志留纪中期关闭的原特提斯洋(Metcalfe, 2021). 显然, 在志留纪中期原特提斯洋关闭前, 南羌塘地块与北羌塘地块应分别划入两个地层大区, 而在原特提斯洋关闭后, 上述两个地块应划入同一个地层大区. 基于这样的特殊性, 本文暂按照原特提斯洋关闭后的标准, 将南羌塘地块与北羌塘地块划入同一个地层大区. 也就是说, 按照本文的标准, 前人所提及的羌塘-三江和冈底斯-喜马拉雅两个地层大区应进行合并.

本文在地层区划等级的选择上, 沿用了前人有关地层区划的划分原则(王鸿祯, 1978; 陈旭和戎嘉余, 1988; 林宝玉等, 1998), 将不同板块上发育的志留系划分到不同的地层区, 而将同一板块上的稳定地区和活动地区作为地层分区的划分依据. 本文将构造-地层区划研究中的羌塘-三江和冈底斯-喜马拉雅两个地层大区合并后的区划降级为地层区, 与王怿等(2021)的划分方案是一致的, 这一地层区的名字也沿用王怿等(2021)的命名, 为西藏-滇西-川西地层区. 因此, 中国青藏高原及其周边志留系总共划分为4个地层区: 西藏-滇西-川西地层区、昆仑-祁连地层区、华南地层区和塔里木地层区, 同王怿等(2021)一致.

(Ⅰ) 西藏-滇西-川西地层区

西藏-滇西-川西地层区可进一步分为6个地层分区(图2):

冈底斯地层分区(Ⅰ$_1$)主要分布在西藏中部, 以西藏申扎(1)和班戈(2)剖面为代表(梁寿生和夏金宝, 1978; 西藏地质局综合普查大队, 1980; 林宝玉, 1981). 该分区志留系基本完整, 岩性以碳酸盐岩为主, 申扎地区为德悟卡下组和扎弄俄玛组, 班戈地区为东卡组. 除此之外, 申扎地区的德悟卡下组下部还发育了少量页岩和泥岩, 而班戈地区的东卡组上部还发育了浅变质碎屑岩. 与下伏地层呈整合接触或接触关系不明, 与上覆地层呈假整合接触或接触关系不明.

喜马拉雅地层分区(Ⅰ$_2$)主要分布在青藏高原的南缘, 以西藏聂拉木-定日一带(3)为代表(穆恩之等, 1973; 林宝玉和邱洪荣, 1982; 穆恩之和陈挺恩, 1984). 该分区志留系基本完整, 下部以碎屑岩为主, 为石器坡组; 上部以碳酸盐岩为主, 为普鲁组. 与下伏和上覆地层均呈整合接触.

滇西地层分区(Ⅰ$_3$)主要分布在滇西地区, 以云南保山(4)剖面为代表(云南省地质局区域地质调查队, 1980; 谭雪春等, 1982; Zhang Y D等, 2014). 该分区志留系基本完整, 下部主要为页岩, 包括仁和桥组和“上仁和桥组”; 上部主要为碳酸盐岩, 包括“栗柴坝组”和牛屎坪组, 其中, “上仁和桥组”仅分布在保山南部的施甸地区, 与保山城区附近的“栗柴坝组”下部相当. 与下伏地层呈假整合接触, 与上覆地层呈整合接触.

北羌塘地层分区(Ⅰ$_4$)主要分布在西藏北部和东部, 以西藏拉竹龙(5)和盐井(6)剖面为代表(章炳高和何国雄, 1984; 胡长寿, 1991; 陈挺恩和张允白, 2010). 该分区志留系发育可能较完整, 下部以碎屑岩为主, 拉竹龙地区为饮水河组和兽形湖组, 盐井地区为恰拉卡组下部;上部以碳酸盐岩为主, 拉竹龙地区为普尔错组和野牛坡组, 盐井地区为恰拉卡组上部. 与下伏地层接

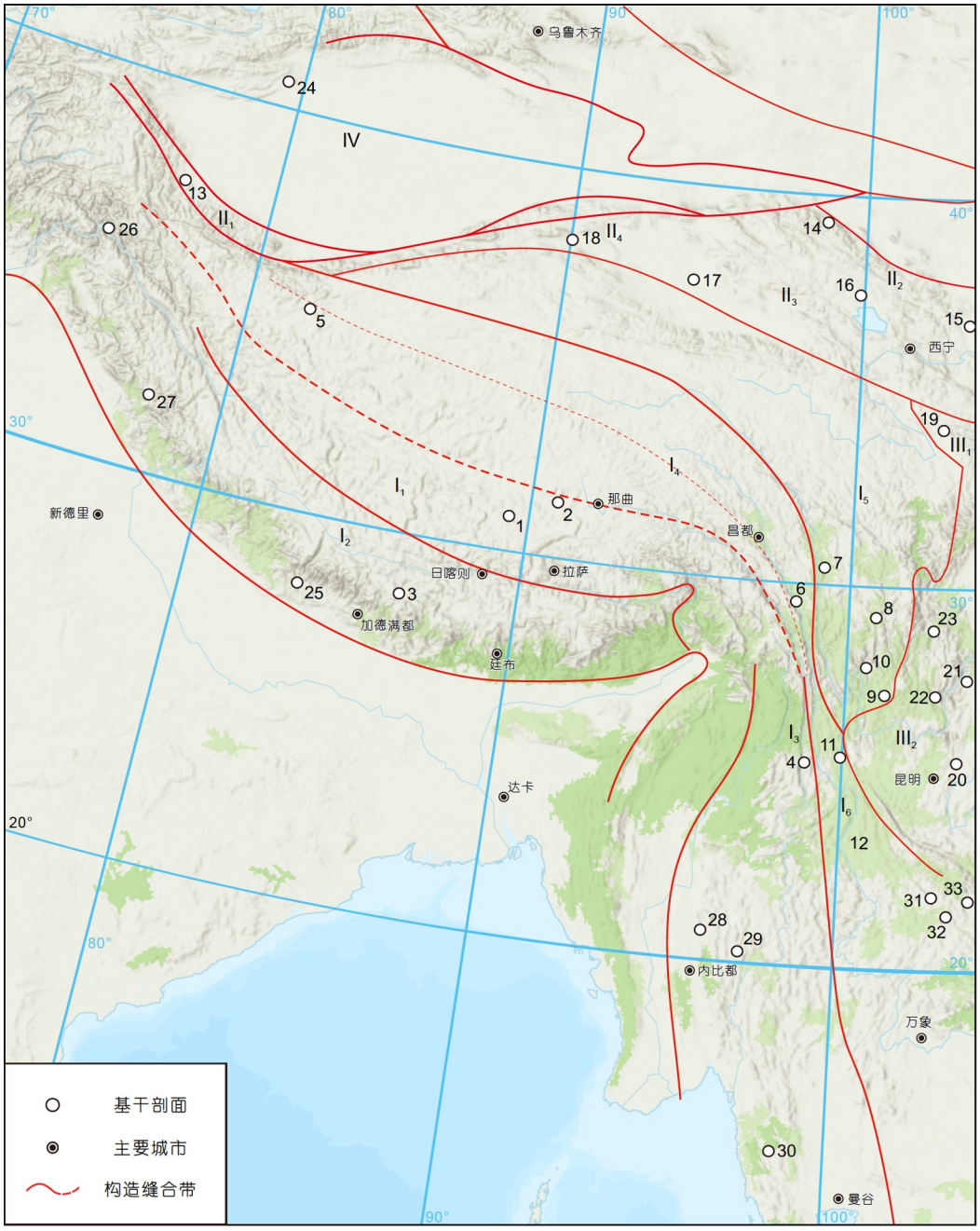

图 1　青藏高原及其周边志留系地层区划和出露分布

代表剖面: 1, 西藏申扎; 2, 西藏班戈; 3, 西藏聂拉木-定日一带; 4, 云南保山; 5, 西藏拉竹龙; 6, 西藏盐井; 7, 四川巴塘; 8, 四川木里; 9, 四川盐边; 10, 云南宁蒗; 11, 云南大理; 12, 云南墨江; 13, 新疆叶城; 14, 甘肃玉门; 15, 宁夏同心; 16, 青海刚察; 17, 青海滩间山; 18, 新疆白干湖; 19, 甘肃迭部; 20, 云南曲靖; 21, 云南大关; 22, 四川布拖; 23, 四川雅安; 24, 新疆柯坪; 25, 尼泊尔塔科拉地区(Thak Khola); 26, 印控克什米尔地区(Kashmir); 27, 印度北部品谷地区(Pin Valley); 28, 缅甸彬乌伦地区(Pyin Oo Lwin); 29, 缅甸掸邦南部(Southern Shan State); 30, 泰国西部; 31, 越南西北部地区(West Bac Bo); 32, 越南东北部地区(East Bac Bo); 33, 越南奠边-义安地区(Dien Bien-Nghe An). 地层区和地层分区: Ⅰ$_1$, 冈底斯地层分区; Ⅰ$_2$, 喜马拉雅地层分区; Ⅰ$_3$, 滇西地层分区; Ⅰ$_4$, 北羌塘地层分区; Ⅰ$_5$, 川西-滇西北地层分区; Ⅰ$_6$, 印支地层分区; Ⅱ$_1$, 昆仑地层分区; Ⅱ$_2$, 北祁连地层分区; Ⅱ$_3$, 南祁连地层分区; Ⅱ$_4$, 柴达木地层分区; Ⅲ$_1$, 秦岭地层分区; Ⅲ$_2$, 中上扬子地层分区; Ⅳ, 塔里木地层区. 地层区划方案所参考的文献主要有徐宪等(1982)、文世宣等(1984)、赵政璋等(2001)、王立全等(2013)、计文化等(2014)、戎嘉余等(2019)、王怿等(2021)

触关系均不明, 与上覆地层呈假整合接触或接触关系不明.

川西-滇西北地层分区(Ⅰ$_5$)主要分布在四川西部和云南西北部, 以四川巴塘(7)、木里(8)、盐边(9)、云南宁蒗(10)剖面为代表(四川省地质局第三区域地质测量队三分队, 1977; 四川省区域地层表编写组, 1978; 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, 1982; 何原相和钱咏臻, 2000; 李忠雄和钱咏臻, 2001; 金淳泰等, 2005; 王成源等, 2009; 王怿等, 2016). 该分区志留系基本缺失普里道利统, 下部发育黑色岩系, 中上部以碳酸盐岩为主(图2). 与下伏地层和上覆地层均呈假整合接触.

印支地层分区(Ⅰ$_6$)主要分布在云南南部, 以云南大理(11)和墨江(12)剖面为代表(云南省地质局第一区域地质测量大队, 1973; 张远志, 1996; 张元动和Lenz, 1999; 王伟和赵平, 2009). 该分区志留系发育程度不一. 大理地区以碳酸盐岩为主, 自下而上包括大坪子组、康廊组和青山组, 而墨江地区则以碎屑岩为主, 包括漫波组和水箐组, 确定发育温洛克统和罗德洛统, 余下地层发育情况还有待进一步研究. 与下伏地层呈整合接触或接触关系不明, 与上覆地层呈整合接触或接触关系不明.

(Ⅱ) 昆仑-祁连地层区

昆仑-祁连地层区可进一步分为4个地层分区(图3):

昆仑地层分区(Ⅱ$_1$)主要沿昆仑山分布, 以新疆叶城(13)剖面为代表(新疆维吾尔自治区区域地层表编写组, 1981; 陈旭等, 1990). 该分区志留系为温泉沟群, 为一套巨厚碎屑岩、灰岩和泥灰岩, 发育程度不明. 与下伏和上覆地层接触关系均不明.

北祁连地层分区(Ⅱ$_2$)主要分布在北祁连山、龙首山和贺兰山西段, 以甘肃玉门(14)和宁夏同心(15)剖面为代表(中国科学院地质研究所等, 1963; 安太庠和郑昭昌, 1990; 葛梅钰等, 1990; 王泽九等, 2018). 该分区志留系仅发育兰多维列统, 中下部可发育黑色岩系(肮脏沟组, 甘肃玉门)或砂岩及灰岩(照花井组, 宁夏同心), 上部发育红层, 包括泉脑沟山组、同心组和旱峡组. 与下伏和上覆地层均呈角度不整合接触.

南祁连地层分区(Ⅱ$_3$)主要分布在南祁连山, 以青海刚察(16)和滩间山(17)剖面为代表(青海省第一区域地质测量队, 1976; 青海省地层表编写小组, 1980; 李峰等, 2006; 付建刚等, 2014; 潘建等, 2019). 该分区志留系发育程度不明, 以变质岩为主, 包括巴龙贡噶尔组和滩间山群c岩性组. 与下伏地层呈整合或角度不整合接触, 与上覆地层接触关系不明或呈整合接触.

柴达木地层分区(Ⅱ$_4$)主要分布在柴达木盆地周缘, 以新疆白干湖(18)剖面为代表(黎敦朋等, 2002, 2003). 该分区志留系主要发育兰多维列统, 为砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩夹碳质板岩组成的浊积岩岩石组合, 被命名为白干湖组. 与下伏地层呈断层接触, 与上覆地层呈角度不整合接触.

(Ⅲ) 华南地层区

华南地层区划入青藏高原及其周边范围的部分, 主要分布在四川西部、北部、贵州西北部、云南东北部和甘肃南部, 可进一步划分为2个地层分区(图3):

秦岭地层分区(Ⅲ$_1$)主要沿秦岭分布, 以甘肃迭部(19)剖面为代表(傅力浦等, 1983; Zhao等, 2012). 该分区志留系以浅变质碎屑岩夹灰岩沉积为主, 自下而上包括安子沟组、各子组、尖尼沟组、小梁沟组、马尔组、红水沟组和南石门沟组. 与下伏和上覆地层均呈整合接触.

中上扬子地层分区(Ⅲ$_2$)主要分布在中、上扬子地区, 以云南曲靖(20)、大关(21)、四川布拖(22)和雅安(23)剖面为代表(叶少华等, 1983; 金淳泰等, 1989; 陈旭和戎嘉余, 1996; 王成源, 2001; 王怿等, 2014; Zhang Y D等, 2014; 蔡家琛等, 2020; Zhao等, 2021). 该分区志留系普遍缺失温洛克统, 发育不齐全, 以碎屑岩为主, 部分地区也发育灰岩和泥灰岩(图3). 与下伏和上覆地层均呈整合或假整合接触.

(Ⅳ) 塔里木地层区

塔里木地层区志留系主要分布在塔里木盆地、南天山和中天山, 其地层区划、沉积特征、代表剖面及划分对比情况见王怿等(2021), 本文不再赘述, 仅在岩石地层划分和对比图中列出与此前划分方案稍有不同的新疆柯坪(24)剖面(图3)(张师本和王成源, 1995; 赵文金等, 2009; 赵文金和朱敏, 2014; 刘玉海等, 2019; 戎嘉余等, 2019).

2.1.2 青藏高原周边国家的志留系特征

在本文所讨论的范围内, 志留系主要分布在南亚的尼泊尔、印度北部、印控克什米尔地区, 以及东南亚的缅甸、泰国西部和越南北部(图1、图4).

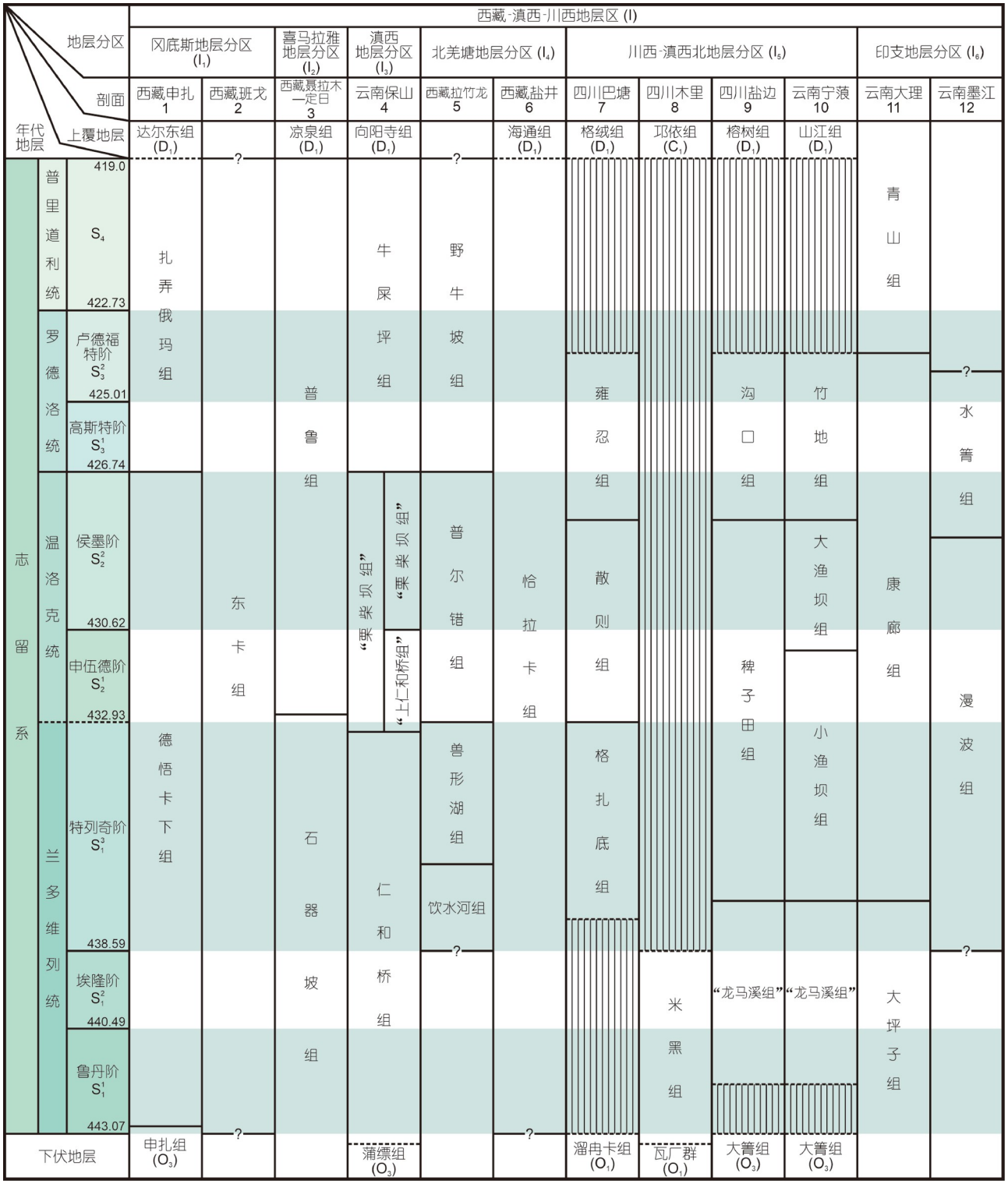

图 2　西藏-滇西-川西地层区志留系岩石地层划分和对比

年代地层框架和地质年龄均来自Melchin等(2020). 剖面序号同图1, 各岩石地层单元间的界线含义见图4

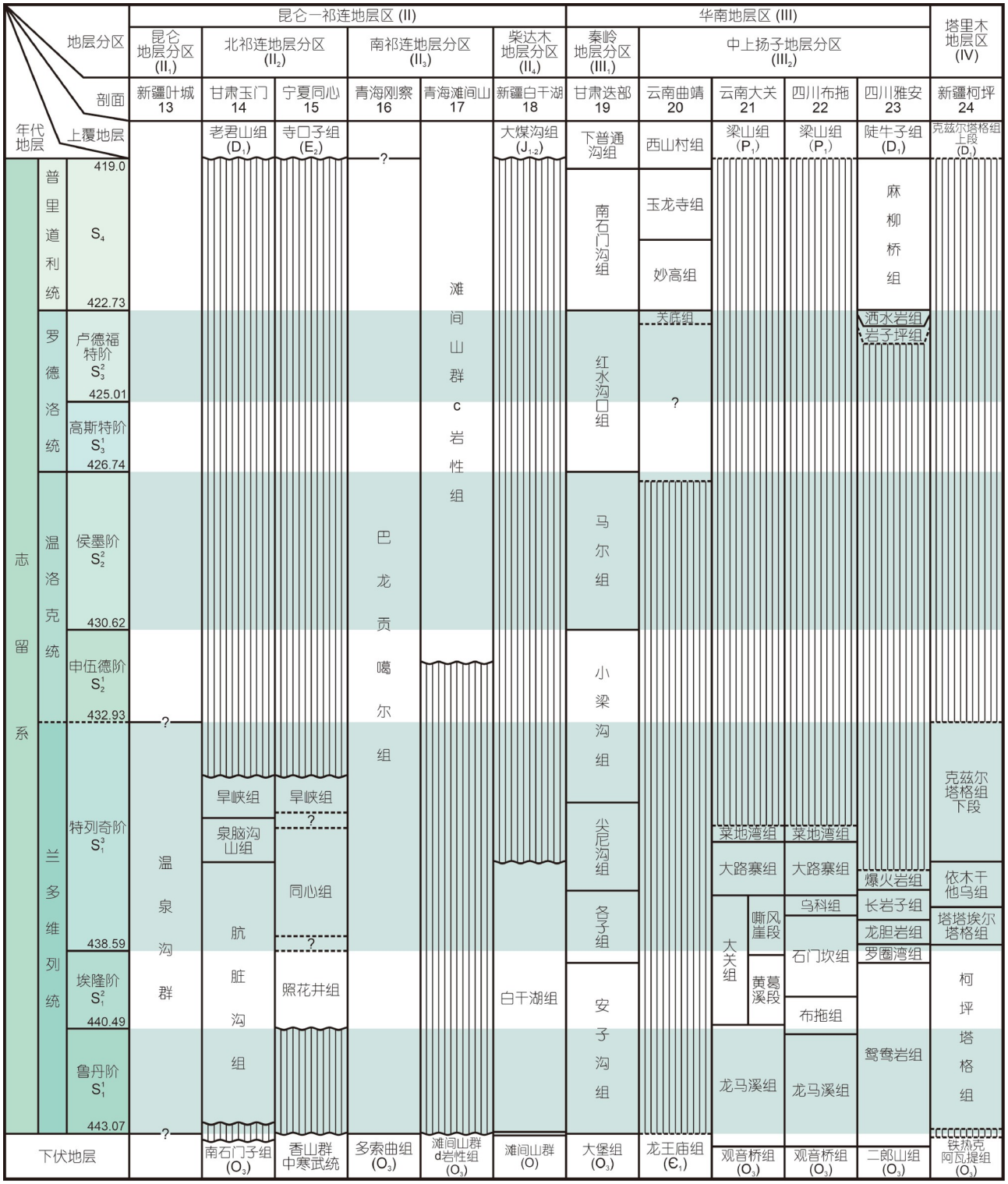

图 3　昆仑-祁连地层区、华南地层区和塔里木地层区志留系岩石地层划分和对比

年代地层框架和地质年龄均来自Melchin等(2020). 各岩石地层单元间的界线含义见图4

尼泊尔塔科拉地区(25)的志留系属于Dark Band组的中下部, 根据岩性可以分为上下两部分: 下部为砂岩与板岩互层, 含兰多维列世晚期的笔石; 上部为砂质白云岩, 含少量海百合和头足类(Colchen, 1971; Dhital, 2015).

印控克什米尔地区(26)及印度北部品谷地区(27)主要发育兰多维列统, 缺失温洛克统至普里道利统. 印控克什米尔地区的志留系属于Gugaldhar组, 岩性为石英砂岩、钙质页岩、钙质砂岩和灰岩, 其中的珊瑚、腕足类、头足类、三叶虫等化石表明其属于兰多维列统(Reed, 1912; Boucot和Gauri, 1968; Bhargava, 2008); 品谷地区的志留系属于Pin组上部Mikkim段, 岩性为厚层白云岩和硅化砂质灰岩夹页岩和粉砂岩, 其中产出兰多维列世的牙形刺、头足类和苔藓动物(Suttner和Kröger, 2006; Suttner, 2007; Suttner和Ernst, 2007; Suttner等, 2007).

缅甸彬乌伦地区(28)的志留系属于Nyaungbaw组, 岩性为中厚层杂色泥质灰岩与钙质页岩互层(Hnin Hnin Swe和Maw Maw Myint, 2019), 页岩中含兰多维列世和温洛克世的笔石, 灰岩中含普里道利世的海百合、苔藓动物和头足类(Reed, 1906; La Touche, 1913; Pascoe, 1959; Hla Thein, 1991; Aye Ko Aung, 2012; Aye Ko Aung和Cocks, 2017). 缅甸掸邦南部(29)的志留系属于Linwe组, 下部为钙质页岩夹泥质灰岩, 中部为瘤状灰岩与页岩、粉砂岩互层, 上部为碎屑岩夹泥质灰岩, 其中页岩中含志留纪早中期的笔石, 灰岩中含志留纪晚期至泥盆纪早期的牙形刺(Myint Lwin Thein, 1973; Maung Maung和Aye Ko Aung, 2009; Aye Ko Aung和Cocks, 2017; Loydell和Kyi Pyar Aung, 2017).

泰国西部(30)的志留系主要分布在通帕蓬和博帕雷两个地区(Bunopas, 1981, 1983). 通帕蓬地区的志留系属于Thong Pha Phum群的中下部, 大致可分为上下两部分: 下部为砂质泥灰岩和黑色页岩, 页岩中含兰多维列世的笔石; 上部为钙质粉砂岩和灰岩, 灰岩中含志留纪晚期的牙形刺(Hagen和Kemper, 1976; Ridd, 2011). 博帕雷地区的志留系属于Bo Phloi组下部, 为一套石英岩、页岩、硅质岩、凝灰岩、千枚岩和薄层灰岩的组合, 化石稀少, 这套地层的下伏地层是奥陶系的灰岩, 而在Bo Phloi组的上部发现了含泥盆纪竹节石的页岩, 因此Bunopas(1981)暂时将Bo Phloi组的下部归为志留系.

越南北部的志留系主要分布在3个区域: 西北部地区(31)、东北部地区(32)和奠边-义安地区(33). 西北部地区的志留系可以分为上下两部分, 下部属于Sinh Vinh组中上部, 主要岩性为厚层白云质灰岩, 其中产珊瑚和海百合; 上部属于Bo Hieng组, 岩性为页岩与灰岩互层, 其中产志留纪晚期的腕足类和珊瑚(Tong和Vu, 2011; Tong等, 2013). 东北部地区的志留系属于Phu Ngu组, 下部为页岩、硅质页岩与粉砂质砂岩互层, 含灰岩和镁铁质喷出岩透镜体, 上部为粉砂质砂岩与页岩、硅质页岩互层, 含灰岩和长英质喷出岩透镜体, 其中下部产出志留纪早期的笔石和一些保存较差的三叶虫和腕足类(Nguyen, 2002; Tong和Vu, 2011; Tong等, 2013). 奠边-义安地区的志留系可分为上下两部分: 下部属于Song Ca组, 岩性为泥质页岩、砂岩和少量灰岩夹层, 其中Song Ca组上部的泥质页岩中产出志留纪早期的笔石(Tong和Vu, 2006); 上部属于Tay Trang组, 岩性为砂岩与粉砂岩、页岩互层, 其中Tay Trang组下部产志留纪晚期的笔石(Nguyen, 1998).

2.2　年代地层和生物地层

志留系4统、7阶的划分方案于20世纪80年代末被国际地层委员会批准, 成为全球志留系划分和对比的标准(Holland和Bassett, 1989). 这一标准也被广泛用于我国志留系地层划分与对比研究中(王泽九等, 2018; 戎嘉余等, 2019; 王怿等, 2021), 青藏高原及其周边的志留系研究中也使用这一标准. 志留系分为兰多维列统(鲁丹阶、埃隆阶和特列奇阶)、温洛克统(申伍德阶和侯墨阶)、罗德洛统(高斯特阶和卢德福特阶)和普里道利统(未建阶). 除申伍德阶底界标志尚存争议外, 其余各统与阶的底界均以特征笔石种的首现为标志(Melchin等, 2020).

由于缺乏足够的较可靠的测年数据, 志留系的地质年代学研究尚存在诸多问题(戎嘉余等, 2019). 本文所采用的各阶底界的年龄, 均来源于最新的综合地层框架(Melchin等, 2020).

尽管青藏高原志留系的生物地层研究迄今已有100余年的历史, 但大部分研究都限于局部地区的分散报道, 目前最新的相对综合性的系统总结也已经是21世纪初的研究成果(赵政璋等, 2001). 因此, 本文将基于最新的各个地区的分散研究, 对青藏高原及其周边(范围即前文提到的中国的4个地层区和其他周边国

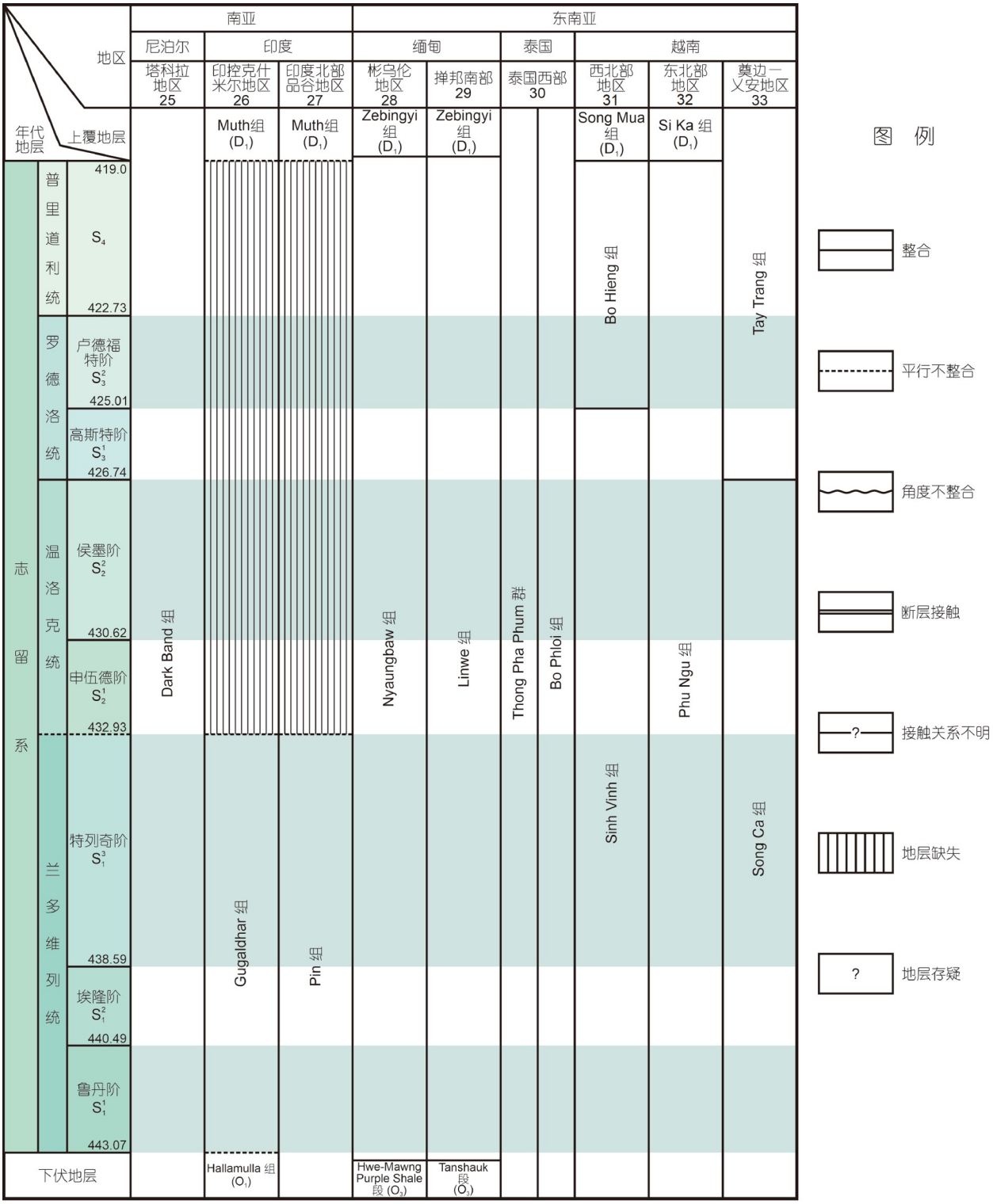

图 4　青藏高原周边国家志留系岩石地层划分和对比

年代地层框架和地质年龄均来自Melchin等(2020)

家)的年代地层和生物地层进行总结. 其中总共涉及10个门类, 包括笔石、牙形刺、几丁虫、头足类、三叶虫、珊瑚、腕足类、鱼类、陆生植物和疑源类.

2.2.1　笔石

青藏高原及其周边的志留系中总共识别出24个笔石带(图5).

鲁丹阶总共识别出4个笔石带: *Akidograptus ascensus*带、*Parakidograptus acuminatus*带、*Cystograptus vesiculosus*带和*Coronograptus cyphus*带. 各带均以带化石的首现为底界标志. *Akidograptus ascensus*带的底界即志留系/兰多维列统/鲁丹阶的底界, 该带在研究区不易被识别, 仅西藏申扎、云南保山和大关可识别出带化石*Akidograptus ascensus* (Mu和Ni, 1983; 叶少华等, 1983; 倪寓南, 1986; Zhang Y D等, 2014), 而在四川布拖和新疆柯坪, 则只能根据笔石组合粗略识别出*Akidograptus ascensus-Parakidograptus acuminatus*带(王怿等, 2014; Wang等, 2015); *Parakidograptus acuminatus*带在研究区内的记录见于西藏申扎、云南保山、四川雅安和新疆塔里木盆地(Mu和Ni, 1983; 倪寓南, 1986; 金淳泰等, 1989; 蔡习尧等, 2012; Zhang Y D等, 2014); *Cystograptus vesiculosus*带在研究区内的记录见于西藏申扎、聂拉木、云南保山、芒市、大关、四川若尔盖和雅安(穆恩之和倪寓南, 1975; 倪寓南等, 1982; 倪寓南, 1986; 金淳泰等, 1989; 宋礼生, 1999; 吕勇等, 2014; Zhang Y D等, 2014; 张娣等, 2020); *Coronograptus cyphus*带在研究区内的记录见于中国西藏申扎、聂拉木、云南保山、大关、甘肃迭部、四川若尔盖、布拖, 以及缅甸彬乌伦地区和掸邦南部(穆恩之和倪寓南, 1975; 叶少华等, 1983; 甘肃省地质矿产局区调队, 1986; 倪寓南, 1986; Hla Thein, 1991; 宋礼生, 1999; Zhang Y D等, 2014; Aye Ko Aung和Cocks, 2017; 张娣等, 2020, 2022).

埃隆阶总共识别出3个笔石带: *Demirastrites triangulatus*带、*Lituigraptus convolutus*带和*Stimulograptus sedgwickii*带. 各带均以带化石的首现为底界标志. *Demirastrites triangulatus*带的底界即埃隆阶的底界, 该带在研究区内的记录见于中国西藏申扎、云南保山、大关、四川布拖、雅安、青海祁连和新疆托克逊, 以及缅甸彬乌伦地区和掸邦南部(穆恩之和张有魁, 1964; 叶少华等, 1983; 刘洪福等, 1988; 金淳泰等, 1989; Hla Thein, 1991; 陈旭和戎嘉余, 1996; 张树岐等, 2003; Zhang Y D等, 2014; Aye Ko Aung和Cocks, 2017; 张娣等, 2020); *Lituigraptus convolutus*带在研究区内的记录见于中国西藏申扎、聂拉木、云南保山、四川雅安、新疆托克逊, 以及缅甸掸邦南部(穆恩之和倪寓南, 1975; 黄枝高和鲁艳敏, 1983; 刘洪福等, 1988; 金淳泰等, 1989; Zhang Y D等, 2014; Aye Ko Aung和Cocks, 2017; 张娣等, 2020; 陈旭等, 2022); *Stimulograptus sedgwickii*带在研究区内的记录见于中国西藏申扎、聂拉木、云南保山、芒市、大关、甘肃迭部、四川雅安、新疆托克逊, 以及缅甸掸邦南部(黄枝高和鲁艳敏, 1983; 甘肃省地质矿产局区调队, 1986; 刘洪福等, 1988; 金淳泰等, 1989; 宋礼生, 1999; 吕勇等, 2014; Zhang Y D等, 2014; Aye Ko Aung和Cocks, 2017; 张娣等, 2020; 陈旭等, 2022).

特列奇阶总共识别出8个笔石带: *Spirograptus guerichi*带、*Spirograptus turriculatus*带、*Streptograptus crispus*带、*Monoclimacis griestoniensis*带、*Monoclimacis crenulata*带、*Oktavites spiralis*/*Stomatograptus grandis*带、*Cyrtograptus sakmaricus*带和*Cyrtograptus* cf. *insectus*带. 除*Cyrtograptus* cf. *insectus*带是基于甘肃舟曲的小梁沟组中*Cyrtograptus* cf. *insectus*的产出记录而建立, 并未明确定义其底界外(甘肃省地质矿产局区调队, 1986; 宋礼生, 1999), 其余各带均以带化石的首现为底界标志. *Spirograptus guerichi*带的底界即特列奇阶的底界, 该带在研究区内的记录仅见于西藏申扎、云南保山和四川若尔盖(倪寓南, 1986; 宋礼生, 1999; 山克强等, 2013); *Spirograptus turriculatus*带在研究区内的记录见于中国西藏申扎、聂拉木、云南保山、甘肃玉门、四川雅安、新疆托克逊, 以及缅甸掸邦南部(中国科学院地质研究所等, 1963; 穆恩之和倪寓南, 1975; 倪寓南等, 1982; 黄枝高和鲁艳敏, 1983; 倪寓南, 1986; 刘洪福等, 1988; 金淳泰等, 1989; 山克强等, 2013; Zhang Y D等, 2014; Aye Ko Aung和Cocks, 2017); *Streptograptus crispus*带在研究区内的记录见于西藏申扎、聂拉木、云南保山、丽江、甘肃玉门、迭部和四川若尔盖(中国科学院地质研究所等, 1963; 穆恩之和倪寓南, 1975; 倪寓南等, 1982; 黄枝高和鲁艳敏, 1983; 甘肃省地质矿产局区调队, 1986; 倪寓南, 1986; 宋礼生, 1999; Zhang Y D等, 2014); *Monoclimacis griestoniensis*带在研究区内的记录见于云南保山、甘

系	统	阶	国际标准	西藏-滇西-川西地层区	昆仑-祁连地层区	华南地层区	塔里木地层区
志留系	普里道利统	419.0	*Istrograptus transgrediens* / "*Monograptus*" *perneri*				
		S_4	"*Monograptus*" *bouceki*				
			Neocolonograptus lochkovensis / *Neocolo. branikensis*				
		422.73	*Neocolo. ultimus* / *Neocolo. parultimus*				
	罗德洛统	卢德福特阶 S_3^2	*Formosograptus formosus*				
			Neocucul. kozlowskii / *Polonogr. podoliensis*				
			Bohemograptus				
		425.01	*Saetograptus leintwardinensis*	*Saetograptus leintwardinensis*			
		高斯特阶 S_3^1	*Lobograptus scanicus*	*Lobograptus scanicus*			
		426.74	*Neodiversograptus nilssoni*	*Lobograptus progenitor* / *Saetograptus varians*		*Neodiversograptus nilssoni*	
	温洛克统	侯墨阶 S_2^2	*Colonograptus ludensis*	*Colonograptus ludensis*			
			Colonograptus deubeli / *Col. praedeubeli*	*Colonograptus deubeli* / *Col. praedeubeli*			
			Gothograptus nassa / *Pristiograptus parvus*				
		430.62	*Cyrtograptus lundgreni*				
		申伍德阶 S_2^1	*Cyr. rigidus* / *M. antennularius* / *M. belophorus*	*Cyrtograptus rigidus*			
			M. riccartonensis / *M. firmus*	*Monograptus flexilis*		*Monograptus riccartonensis*	
		432.93	*Cyr. murchisoni*	*Cyrtograptus murchisoni*			
	兰多维列统	特列奇阶 S_1^3	*Cyr. centrifugus*				
			Cyr. insectus			*Cyrtograptus* cf. *insectus*	
			Cyr. lapworthi			*Cyrtograptus sakmaricus*	
			Oktavites spiralis	*Oktavites spiralis* / *Stomatogr. grandis*		*Oktavites spiralis* / *Stomatogr. grandis*	
			Monoclimacis crenulata	*Monoclimacis crenulata*			
			Monoclimacis griestoniensis	*Monoclimacis griestoniensis*	*Monoclimacis griestoniensis*	*Monoclimacis griestoniensis*	*Monoclimacis griestoniensis*
			Streptograptus crispus	*Streptograptus crispus*	*Streptograptus crispus*	*Streptograptus crispus*	
			Spirograptus turriculatus	*Spirograptus turriculatus*	*Spirograptus turriculatus*	*Spirograptus turriculatus*	*Spirograptus turriculatus*
		438.59	*Spirograptus guerichi*	*Spirograptus guerichi*		*Spirograptus guerichi*	
		埃隆阶 S_1^2	*Stimulograptus halli* / *S. sedgwickii*	*Stimulograptus sedgwickii*		*Stimulograptus sedgwickii*	*Stimulograptus sedgwickii*
			Lituigr. convolutus	*Lituigraptus convolutus*		*Lituigraptus convolutus*	*Lituigraptus convolutus*
			Pribylogr. leptotheca / *Pernerogr. argenteus*	*Demirastrites triangulatus*	*Demirastrites triangulatus*	*Demirastrites triangulatus*	*Demirastrites triangulatus*
		440.49	*D. pectinatus* / *D. triangulatus*				
		鲁丹阶 S_1^1	*Coronograptus cyphus*	*Coronograptus cyphus*		*Coronograptus cyphus*	
			Cystograptus vesiculosus	*Cystograptus vesiculosus*		*Cystograptus vesiculosus*	
			Parakidograptus acuminatus	*Parakidograptus acuminatus*		*Parakidograptus acuminatus*	*Parakidograptus acuminatus*
		443.07	*Akidograptus ascensus*	*Akidograptus ascensus*		*Akidograptus ascensus*	*Akidograptus ascensus*

图 5　青藏高原及其周边志留系笔石生物地层框架

Col., *Colonograptus*; *Cyr.*, *Cyrtograptus*; *D.*, *Demirastrites*; *Lituigr.*, *Lituigraptus*; *M.*, *Monograptus*; *Neocolo.*, *Neocolonograptus*; *Neocucul.*, *Neocucullograptus*; *Pernerogr.*, *Pernerograptus*; *Polonogr.*, *Polonograptus*; *Pribylogr.*, *Pribylograptus*; *S.*, *Stimulograptus*; *Stomatogr.*, *Stomatograptus*. 年代地层框架和地质年龄均来自Melchin等(2020)

肃玉门、四川雅安、新疆托克逊、白干湖，以及缅甸掸邦南部(中国科学院地质研究所等, 1963; 倪寓南等, 1982; 刘洪福等, 1988; 金淳泰等, 1989; 黎敦朋等, 2002; Zhang Y D等, 2014; Aye Ko Aung和Cocks, 2017); *Monoclimacis crenulata*带在研究区内的记录仅见于云南墨江(Zhang等, 2013); *Oktavites spiralis*/*Stomatograptus grandis*带在研究区内的记录见于西藏聂拉木-定日一带、盐井、甘肃迭部和四川若尔盖(甘肃省地质矿产局区调队, 1986; 林宝玉, 1989; 胡长寿, 1991; 宋礼生, 1999); *Cyrtograptus sakmaricus*带在研究区内的记录仅见于甘肃舟曲(甘肃省地质矿产局区调队, 1986).

申伍德阶总共识别出4个笔石带: *Cyrtograptus murchisoni*带、*Monograptus riccartonensis*带、*Monograptus flexilis*带和*Cyrtograptus rigidus*带. 各带均以带化石的首现为底界标志. *Cyrtograptus murchisoni*带的底界曾被看作温洛克统/申伍德阶的底界(Loydell, 2012), 但最新研究认为, 温洛克统/申伍德阶的底界应该略高于该带的底界(Melchin等, 2020), 该带在研究区内的记录仅见于中国西藏聂拉木, 以及缅甸彬乌伦地区(穆恩之和倪寓南, 1975; 林宝玉和邱洪荣, 1983; Hla Thein, 1991; Aye Ko Aung和Cocks, 2017); *Monograptus riccartonensis*带在研究区内的记录仅见于甘肃迭部和舟曲(宋礼生, 1999); *Monograptus flexilis*带在研究区内的记录仅见于云南保山(倪寓南等, 1982; 倪寓南和林尧坤, 2000; Zhang Y D等, 2014); *Cyrtograptus rigidus*带在研究区内的记录仅见于云南保山(倪寓南和林尧坤, 2000; Zhang Y D等, 2014).

侯墨阶总共识别出2个笔石带: *Colonograptus deubeli*/*Colonograptus praedeubeli*带和*Colonograptus ludensis*带. 各带均以带化石的首现为底界标志. *Colonograptus deubeli*/*Colonograptus praedeubeli*带在研究区内的记录仅见于云南保山和墨江(倪寓南, 1997; Zhang和Lenz, 1997; 张元动和Lenz, 1999; Zhang Y D等, 2014); *Colonograptus ludensis*带在研究区内的记录仅见于云南墨江(Zhang和Lenz, 1997; 张元动和Lenz, 1999; Zhang Y D等, 2014).

高斯特阶总共识别出2个笔石带: *Saetograptus varians*/*Lobograptus progenitor*/*Neodiversograptus nilssoni*带和*Lobograptus scanicus*带. 各带均以带化石的首现为底界标志. *Saetograptus varians*/*Lobograptus progenitor*/*Neodiversograptus nilssoni*带的底界即罗德洛统/高斯特阶的底界, 该带在研究区的记录仅见于云南丽江、墨江和甘肃迭部(倪寓南等, 1982; 张元动和Lenz, 1999; 倪寓南和宋礼生, 2002); *Lobograptus scanicus*带在研究区内的记录仅见于云南墨江(Zhang和Lenz, 1997; 张元动和Lenz, 1999; Zhang Y D等, 2014).

卢德福特阶总共识别出1个笔石带: *Saetograptus leintwardinensis*带. 该带以带化石的首现为底界标志, 其底界即卢德福特阶的底界, 在研究区内的记录仅见于云南墨江(Zhang和Lenz, 1997; 张元动和Lenz, 1999).

普里道利统至今尚未建阶. 其底界以笔石*Neocolonograptus parultimus*的首现为标志, 然而青藏高原及其周边并无该笔石种的产出. 尽管甘肃迭部报道了笔石*Neocolonograptus ultimus*的产出记录(宋礼生, 1999), 但该种的首现略高于带化石*Neocolonograptus parultimus*, 且其末现上延至更高的层位中(Lenz和Kozłowska-Dawidziuk, 2004), 因此仅根据*Neocolonograptus ultimus*的产出并不能确定普里道利统的底界的位置.

此外, 在中国西藏拉竹龙、玛依岗日、青海阳康、新疆达布达尔和莎车, 以及尼泊尔塔科拉地区、越南东北部和奠边-义安地区均有志留纪笔石的报道(青海省第一区域地质测量队, 1976; 王朴, 1992; Nguyen, 1998; 王世炎等, 2003; 程立人等, 2007; 艾永亮等, 2008; 陈挺恩和张允白, 2010; Tong和Vu, 2011; Tong等, 2013; Dhital, 2015), 但并不能精确界定到具体的笔石带.

2.2.2　牙形刺

青藏高原及其周边的志留系中总共识别出16个牙形刺带(图6).

*Ozarkodina obesa*带的底界标志并未给出明确的定义, 但据Wang和Aldridge(2010)所绘制的贵州雷家屯剖面的属种延限图, 应定义为带化石的首现. 该带下至鲁丹阶中部, 上至埃隆阶中部, 在研究区内的记录见于云南大理、金平和大关(董致中和王伟, 2006; Wang和Aldridge, 2010; 王成源, 2013). 但是, 云南金平新滩组中产出的*Ozarkodina obesa*(=*Spathognathodus obesus*)的标本并不完整, 难以确定其是否确为该种, 而大关的大关组黄葛溪段下部属于*Ozarkodina*

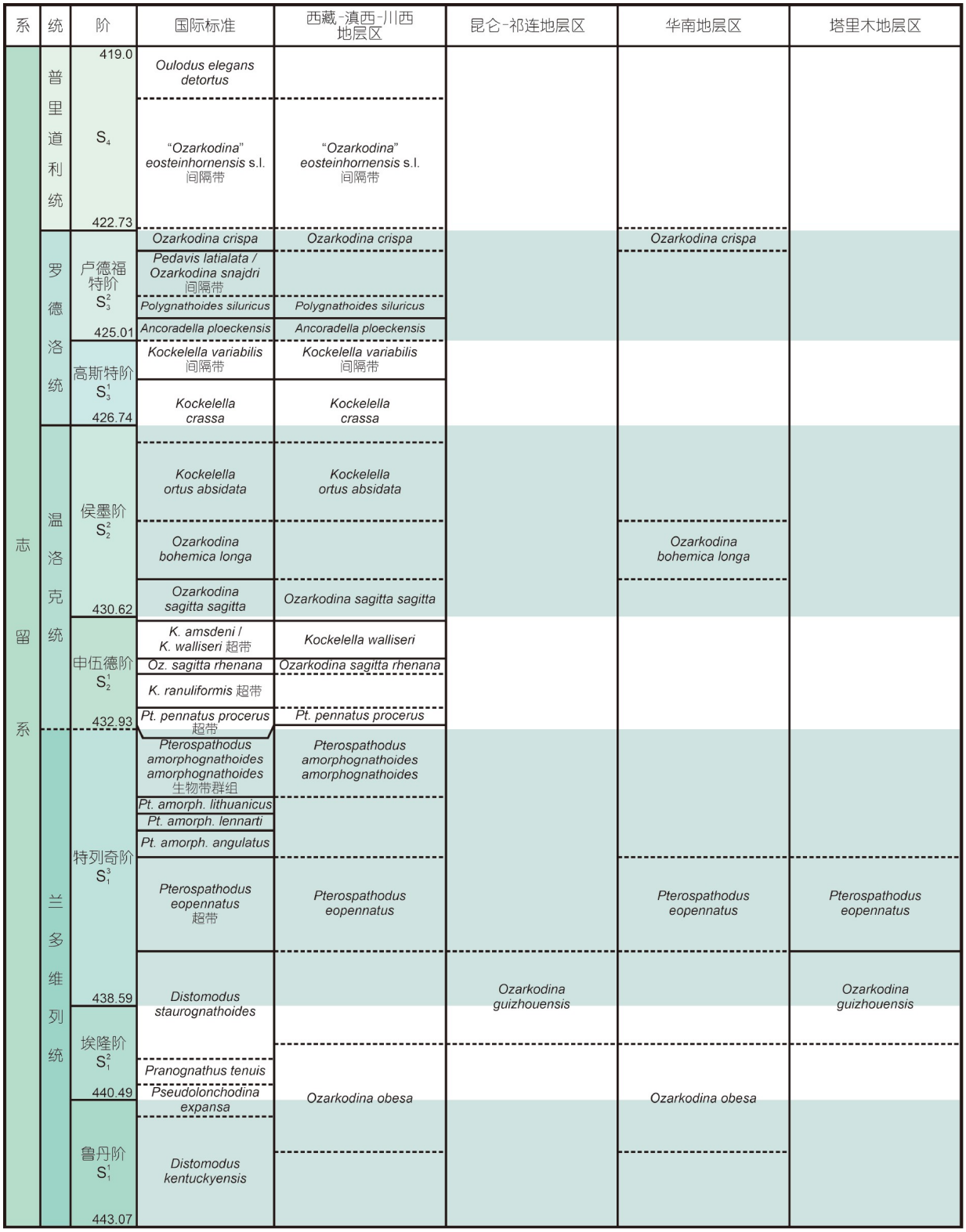

图 6　青藏高原及其周边志留系牙形刺生物地层框架

amorph., *amorphognathoides*; *K*., *Kockelella*; *Oz*., *Ozarkodina*; *Pt*., *Pterospathodus*. 年代地层框架和地质年龄均来自Melchin等(2020)

*obesa*带的意见与下伏龙马溪组顶部产出埃隆阶最上部*Stimulograptus sedgwickii*带的笔石(叶少华等, 1983)稍有冲突. 因此, 研究区是否能识别出*Ozarkodina obesa*带还有待进一步研究.

*Ozarkodina guizhouensis*带以带化石的首现为底界标志. 该带下至埃隆阶中部, 上至特列奇阶下部, 在研究区内的记录非常稀少. 张师本和王成源(1995)报道了新疆巴楚依木干他乌组下部的牙形刺, 指出其中的*Ozarkodina* sp. A与*Ozarkodina guizhouensis*的相似性, 认为依木干他乌组下部很可能属于这个带. 安太庠和郑昭昌(1990)报道了宁夏同心照花井组中的牙形刺, 尽管并未发现带化石*Ozarkodina guizhouensis*, 但其中*Pranognathus posteritenuis*(=*Pterospathodus posteritenuis*)的延限仅限于埃隆阶上部(Uyeno和Barnes, 1983; Zhang和Barnes, 2004), 因此产出*Pranognathus posteritenuis*的地层可大致与*Ozarkodina guizhouensis*生物带下部进行对比.

*Pterospathodus eopennatus*带以带化石的首现为底界标志. 该带仅限于特列奇阶中部, 在研究区内的记录见于西藏申扎、四川盐边、雅安、云南宁蒗、大理、大关和新疆乌恰(邱洪荣, 1985; 金淳泰等, 1989; 陈旭等, 1990; 李忠雄和钱咏臻, 2001; 董致中和王伟, 2006; 王成源等, 2009; 王伟和赵平, 2009; Wang和Aldridge, 2010; 王成源, 2013; Yan和Wu, 2021).

*Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides*带以带化石(图7o)的首现为底界标志. 该带下至特列奇阶上部, 上至申伍德阶下部, 在研究区内的记录见于西藏申扎、定日、云南保山、宁蒗、大理和四川盐边(邱洪荣, 1985; 喻洪津, 1985; 李忠雄和钱咏臻, 2001; 金淳泰等, 2005; 董致中和王伟, 2006; 王成源等, 2009; 王伟和赵平, 2009; Zhang Y D等, 2014; Chen等, 2020; Yan和Wu, 2021). 该带与*Pterospathodus eopennatus*带之间, 还应有*Pterospathodus celloni*带, 可进一步识别出2个亚带: *Pterospathodus amorphognathoides angulatus*亚带和*Pterospathodus* cf. *amorphognthoides lennarti*亚带(王成源, 2013). 在研究区, 西藏申扎和四川盐边均识别出*Pterospathodus amorphognathoides angulatus*, 但该亚种均与*Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides*共生(邱洪荣, 1985; Yan和Wu, 2021), 而据Männik(1998)对于*Pterospathodus*属演化的研究, 这两个亚种不应存在共生关系. 因此这两个亚种在中国的共生关系, 还需要进一步开展更高分辨率的研究工作来进行确认. 本文暂不列出*Pterospathodus celloni*带.

*Pterospathodus pennatus procerus*带以其下一个带的带化石*Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides*的末现为底界标志, 以带化石(图7n)的末现为顶界标志. 该带仅限于申伍德阶下部, 在研究区内的记录仅见于云南保山(阎春波等, 2019; Chen等, 2020).

*Ozarkodina sagitta rhenana*带以带化石的首现为底界标志. 该带仅限于申伍德阶中部, 在研究区内的记录仅见于四川盐边(金淳泰等, 2005; 王成源等, 2009).

*Kockelella walliseri*带以带化石的首现为底界标志. 该带仅限于申伍德阶上部, 在研究区内的记录仅见于四川盐边(Yan和Wu, 2021).

*Ozarkodina sagitta sagitta*带以带化石的首现为底界标志. 该带下至申伍德阶上部, 上至侯墨阶下部, 在研究区内的记录见于西藏聂拉木、云南保山和四川盐边(Chen等, 2020, 2022; Yan和Wu, 2021).

*Ozarkodina bohemica longa*带以带化石的首现为底界标志. 该带仅限于侯墨阶中部, 其带化石仅在甘肃迭部有过报道(=*Ozarkodina sagitta bohemica*; 安太庠, 1987, 图版32, 图21, 22). 但由于*Ozarkodina bohemica longa*可以上延至*Kockelella ortus absidata*带, 因此该带是否可以在研究区被识别还有待进一步研究.

*Kockelella ortus absidata*带以带化石的首现为底界标志. 该带仅限于侯墨阶上部, 在研究区内的记录仅见于云南保山(Chen等, 2020).

*Kockelella crassa*带以带化石(图7t)的首现为底界标志. 该带下至侯墨阶上部, 上至高斯特阶下部, 在研究区内的记录见于西藏申扎、聂拉木、拉竹龙和云南保山(邱洪荣, 1985; 喻洪津, 1985; 陈挺恩和张允白, 2010; Chen等, 2020, 2022).

*Kockelella variabilis*间隔带以其下一个带的带化石*Kockelella crassa*的末现为底界标志. 该带仅限于高斯特阶上部, 在研究区内的记录见于西藏申扎、聂拉木、拉竹龙和云南保山(喻洪津, 1985; 陈挺恩和张允白, 2010; Zhang Y D等, 2014; Chen等, 2020, 2022).

*Ancoradella ploeckensis*带以带化石(图7p)的首现为底界标志. 该带仅限于卢德福特阶下部, 在研究区内的记录见于西藏申扎、聂拉木、拉竹龙、云南保山

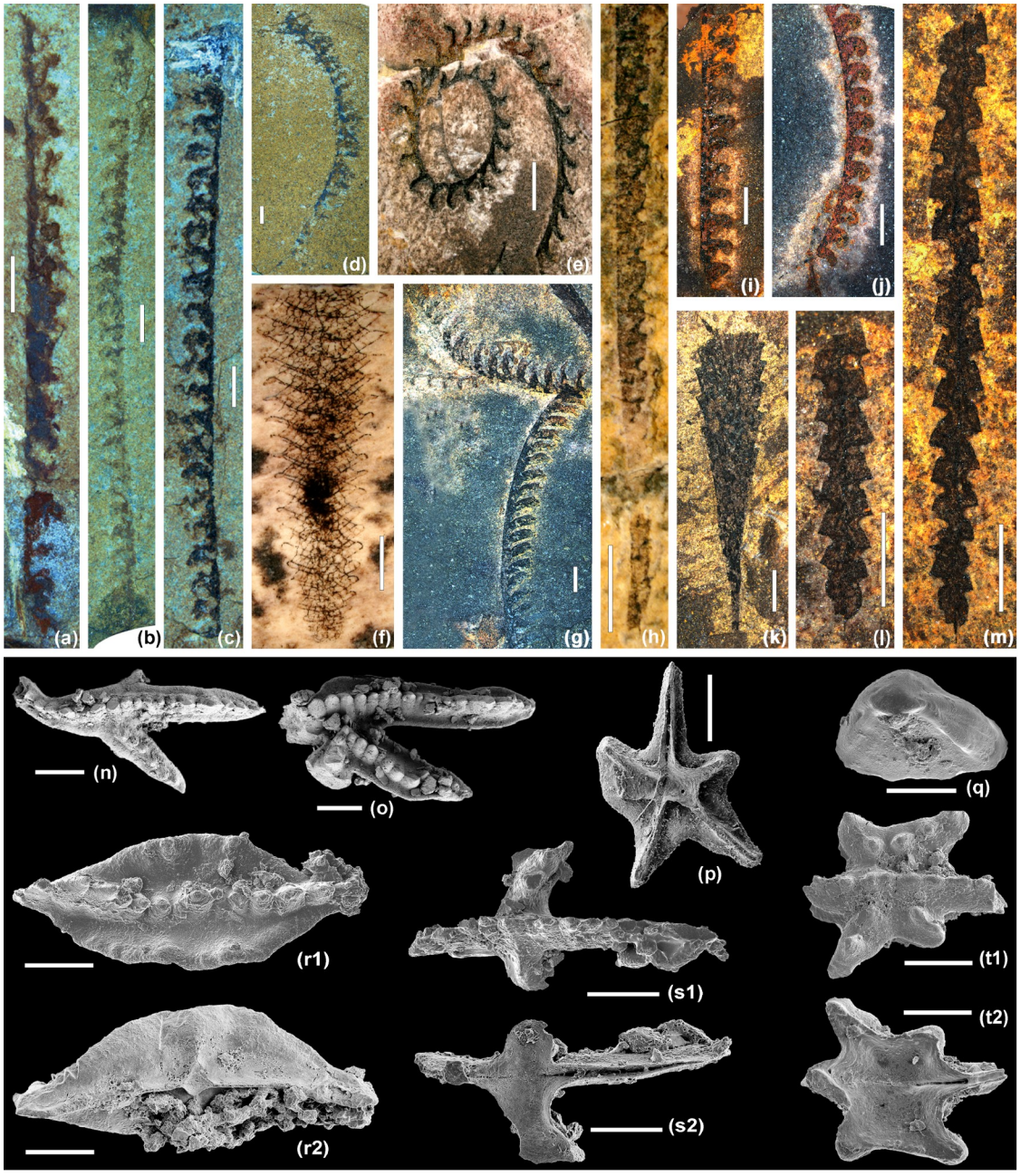

图 7　青藏高原及其周边志留纪部分重要笔石和牙形刺化石

笔石: (a)和(b) *Stimulograptus sedgwickii*, 西藏聂拉木石器坡组(引自陈旭等, 2022); (c) *Campograptus lobiferus*, 西藏聂拉木石器坡组(引自陈旭等, 2022); (d) *Lituigraptus* cf. *convolutus*, 西藏聂拉木石器坡组(引自陈旭等, 2022); (e) *Oktavites kemanensis*, 云南墨江漫波组(引自Zhang Y D等, 2014); (f) *Retiolites geinitzianus*, 云南墨江漫波组(引自Zhang Y D等, 2014); (g) *Lituigraptus convolutus*, 云南保山仁和桥组(引自Zhang Y D等, 2014); (h) *Monoclimacis crenulata*, 云南墨江漫波组(引自Zhang Y D等, 2014); (i)和(j) *Campograptus lobiferus*, 云南保山仁和桥组(引自Zhang Y D等, 2014); (k) *Cephalograptus cometa*, 云南保山仁和桥组(引自Zhang Y D等, 2014); (l)和(m) *Metaclimacograptus sculptus*, 云南保山仁和桥组(引自Zhang Y D等, 2014). 牙形刺: (n) *Pterospathodus pennatus procerus*, 云南保山"栗柴坝组"(引自Chen等, 2020); (o) *Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides*, 云南保山"栗柴坝组"(引自Chen等, 2020); (p) *Ancoradella ploeckensis*, 云南保山牛屎坪组(引自Chen等, 2020); (q) *Pseudooneotodus linguicornis*, 西藏聂拉木普鲁组(引自Chen等, 2022); (r) *Polygnathoides siluricus*, 西藏聂拉木普鲁组(引自Chen等, 2022); (s) *Kockelella maenniki*, 西藏聂拉木普鲁组(引自Chen等, 2022); (t) *Kockelella crassa*, 西藏聂拉木普鲁组(引自Chen等, 2022). 笔石的比例尺为2mm, 牙形刺的比例尺为200μm

和四川盐边(邱洪荣, 1985; 喻洪津, 1985; 金淳泰等, 2005; 王成源等, 2009; 陈挺恩和张允白, 2010; 阎春波等, 2019; Chen等, 2022).

*Polygnathoides siluricus*带以带化石(图7r)的首现和末现分别为其底界与顶界的标志. 该带仅限于卢德福特阶下部, 在研究区内的记录见于西藏申扎、聂拉木、拉竹龙、云南保山、大理和四川盐边(邱洪荣, 1985; 喻洪津, 1985; 金淳泰等, 2005; 董致中和王伟, 2006; 王成源等, 2009; 陈挺恩和张允白, 2010; Zhang Y D等, 2014; 阎春波等, 2019; Chen等, 2020, 2022).

*Ozarkodina crispa*带以带化石的首现和末现分别为其底界与顶界的标志. 该带下至卢德福特阶上部, 上至普里道利统下部, 在研究区内的记录见于云南大理、曲靖、甘肃迭部和四川雅安(王成源, 1980, 1981, 2001; 金淳泰等, 1989; Walliser和Wang, 1989; 董致中和王伟, 2006). 但要指出的是, 蔡家琛等(2020)结合该地区产出的鱼类化石, 提出在云南曲靖用*Ozarkodina crispa*的顶峰带而非其首现和末现来确定该带, 并且厘定了云南曲靖志留系的岩石地层划分与对比方案. 目前该方案已被本文所采用(图3), 但是对于*Ozarkodina crispa*的延限以及同名带在中国的定义是否需要进行修订, 还有待未来开展进一步研究.

"*Ozarkodina*" *eosteinhornensis* s.l. 间隔带以其上一个带的带化石*Oulodus elegans detortus*的首现为顶界标志, 但研究区并未发现该种. 根据*Oulodus elegans elegans*和*Zieglerodina*等属种的产出, 大致可以在西藏聂拉木和云南保山识别出该间隔带(Chen等, 2020, 2022).

此外, 在中国西藏盐井、印度北部品谷地区和缅甸掸邦南部也有志留纪牙形刺的报道(胡长寿, 1991; Suttner等, 2007; Maung Maung和Aye Ko Aung, 2009), 但并不能精确界定到具体的牙形刺带.

2.2.3　几丁虫

相比笔石和牙形刺, 青藏高原志留系的几丁虫生物地层学研究程度极弱, 仅西藏拉竹龙的饮水河组少量报道过兰多维列统特列奇阶的几丁虫*Plectochitina brevicollis*(陈挺恩和张允白, 2010). 周边地区的研究程度则相对较高. 新疆塔里木盆地的柯坪塔格组识别出兰多维列统鲁丹阶至埃隆阶的3个几丁虫带: *Beloechitina postrobusta*带、*Conochitina electa*带和*Spinachitina maennili*带(张师本等, 2001; 蔡习尧等, 2005; 唐鹏等, 2012). 云南大关的大路寨组中上部识别出兰多维列统特列奇阶的2个几丁虫带: *Plectochitina brevicollis*带和*Angochitina longicollis*带(Geng等, 1997). 云南曲靖的玉龙寺组上部识别出罗德洛统上部至普里道利统的2个几丁虫带: *Ancyrochitina sinica*带和*Margachitina elegans*带(Geng等, 1997; 耿良玉等, 1999; Zhang Y D等, 2014). 此外, 新疆叶城的温泉沟群中下部发现了丰富的几丁虫化石, 但无法界定到具体的几丁虫带(姚建新等, 2005; Yao等, 2006).

2.2.4　头足类

头足类是青藏高原的志留系研究程度较高的门类之一. 由下至上主要可识别出3个组合: 下部的*Michelinoceras* (*Kopaninoceras*) *capax*组合主要分布于西藏聂拉木的石器坡组顶部, 时代为温洛克世最早期(穆恩之等, 1973; 陈均远, 1975; 陈均远等, 1981); 中部的*Michelinoceras michelini*组合主要分布于西藏聂拉木的普鲁组下部、拉竹龙的普尔错组和云南保山的"栗柴坝组", 时代为温洛克世(陈挺恩, 1983; 陈挺恩和张允白, 2010; Zhang Y D等, 2014); 上部的*Michelinoceras* (*Kopaninoceras*) *jucundum*组合主要分布于西藏申扎的扎弄俄玛组、聂拉木的普鲁组上部、拉竹龙的野牛坡组和云南保山的牛屎坪组, 时代为罗德洛世至普里道利世(陈挺恩, 1983; 陈挺恩和张允白, 2010; Zhang Y D等, 2014). 此外, 西藏班戈的东卡组中产出*Harrisoceras-Allanoceras*组合, 时代为兰多维列世晚期至温洛克世(陈挺恩, 1981, 1983; 李学森和程立人, 1988).

青藏高原周边地区的志留系也有头足类动物群的产出. 云南大关的大路寨组中产出四川角石(*Sichuanoceras*)动物群, 时代为兰多维列世特列奇中期(Zhang Y D等, 2014). 云南曲靖的关底组中产出*Heyuncunoceras*动物群, 妙高组中产出*Euthyocycloceras*动物群, 玉龙寺组中产出*Yunnanoceras*动物群, 时代为罗德洛世晚期至普里道利世(陈均远等, 1981). 甘肃迭部的志留系中产出的头足类由下至上可划分为4个组合, 分别是*Anaspyroceras*组合、*Kionoceras styliforme*组合、*Heyuncunoceras-Euryarthroceras*组合和*Ophioceras-Dnestroceras*组合(陈均远, 1983), 其时代还有待进一步厘定. 此外, 四川雅安的长岩子组和爆火岩组, 以及新疆南天山的志留系也有少量头足类的报道(王宝瑜,

1988; 金淳泰等, 1989; 赵秀丽等, 2006).

2.2.5 三叶虫

青藏高原的志留纪三叶虫研究程度较弱. 西藏定结的普鲁组、云南保山施甸的"上仁和桥组"、甘肃玉门的泉脑沟山组和旱峡组均报道过三叶虫, 但由于标本量少且保存状况较差, 并没有进行系统研究(张文堂和范嘉松, 1960; 倪寓南等, 1982; 穆恩之和陈挺恩, 1984). 相比之下, 周边地区的三叶虫研究程度则相对更高. 新疆塔里木盆地的柯坪塔格组中段建立了*Encrinuroides-Raphiophorus-Latiproetus*组合, 时代为兰多维列世鲁丹中晚期至埃隆中期(张师本等, 2001). 云南大关和四川布拖的大路寨组产出王冠虫(*Coronocephalus*)动物群, 时代大致为兰多维列世特列奇中期(王怿等, 2014; Zhang Y D等, 2014). 西藏拉竹龙的普尔错组中产出*Contracheirurus zuvegesi*, 被认为是中国境内迄今见到的最标准的温洛克世的三叶虫化石(陈挺恩和张允白, 2010). 云南曲靖的玉龙寺组产出*Warburgella rugulosa sinensis*, 甘肃迭部的南石门沟组产出*Encrinurus tumidus-Grossoproetus perconvexus*组合, 时代为普里道利世(伍鸿基, 1977, 1987). 此外, 四川雅安的志留系(金淳泰等, 1989), 以及缅甸掸邦北部的Namhsim组和泰国东北部的志留系(Pascoe, 1959; Kobayashi和Sakagami, 1989)均有三叶虫的产出记录.

2.2.6 珊瑚

青藏高原的志留纪珊瑚研究程度较弱. 四川巴塘的格扎底组和散则组分别产出*Cysticonophyllum-Favosites*组合和*Microplasma-Zelophyllum*组合(邓占球和章炎生, 1985; 何心一和陈建强, 2006). 西藏申扎的扎弄俄玛组、班戈的东卡组、聂拉木的普鲁组、札达的志留系、云南大理的康廊组和青山组、新疆且末的温泉沟群和甘肃玉门的泉脑沟山组也报道了珊瑚的产出(Yang, 1948; 俞昌民, 1962; 吴望始, 1975; 梁寿生和夏金宝, 1978; Liao, 1981; 许汉奎等, 1981; 邓占球, 1982, 1986; 吴望始等, 1982; 王宝瑜, 1983; 黄柱熙和程立人, 1988; 何心一, 1990).

在周边地区, 甘肃迭部的各子组产出*Kodonophyllum-Amplexoides-Eostauria*组合, 马尔组产出*Holmophyllia-Mucophyllum-Holmophyllum*组合, 红水沟组产出*Niponophyllum-Columnolasma*组合与*Altaja-Schlotheimophyllum*组合, 南石门沟组产出*Entelophyllia-Ulanophyllum*组合(曹宣铎和欧阳萱, 1987; 杨恒书等, 1990; 何心一和陈建强, 1999, 2006). 而云南曲靖的关底组产出*Micula-Ketophyllum-Kyphophyllum*组合, 妙高组产出*Diplochone-Phaulactis*组合, 玉龙寺组产出*Pseudocystiphyllum-Zelophyllum*组合(何心一和陈建强, 2004, 2006). 四川布拖的石门坎组、雅安的罗圈湾组、龙胆岩组、驷狗岩组、爆火岩组和麻柳桥组, 新疆天山地区的志留系(蔡土赐, 1984; 金淳泰等, 1989; 邓占球, 1997; 王宝瑜等, 2001; 赵秀丽等, 2006; 王怿等, 2014), 以及泰国东北部的志留系(Sakagami和Nakornsri, 1987)也均有珊瑚的报道.

2.2.7 腕足类

青藏高原的志留纪腕足类研究程度较弱. 西藏拉竹龙的兽形湖组产出大量的*Hindella xizangensis*, 群落的总体特征表明其属于兰多维列统鲁丹阶下部(金玉玕和孙东立, 1981; 陈挺恩和张允白, 2010; Rong等, 2017). 然而, 在兽形湖组的下伏地层饮水河组中, 却识别出了兰多维列统特列奇阶的几丁虫*Plectochitina brevicollis*(陈挺恩和张允白, 2010). 因此, 西藏拉竹龙的饮水河组和兽形湖组的关系还需要进一步的岩石地层学和生物地层学研究来厘清. 此外, 西藏申扎的德悟卡下组和扎弄俄玛组、班戈的东卡组, 云南保山的牛屎坪组、施甸的"上仁和桥组"、丽江的稗子田组, 也都有少量腕足类的产出(梁寿生和夏金宝, 1978; 倪寓南等, 1982; 张树岐等, 2003; Zhang Y D等, 2014).

青藏高原周边地区的志留纪腕足类研究程度则更高. 四川布拖的布拖组产出兰多维列统鲁丹阶上部至埃隆阶下部的*Eostropheodonta-Levenea*组合, 大路寨组产出特列奇阶中部的*Salopinella-Spinochonetes*组合(王怿等, 2014). 甘肃迭部的小梁沟组产出特列奇阶中部的*Nalivkinia-Xinanospirifer*组合(傅力浦等, 1983; 甘肃省地质矿产局区调队, 1986), 南石门沟组产出小莱采贝(*Retziella*)动物群(戎嘉余等, 1987). 同样产出小莱采贝动物群的还有云南曲靖的关底组和妙高组、四川雅安的洒水岩组、若尔盖的南石门沟组和越南北部的Kien An组(戎嘉余和杨学长, 1980, 1981; 傅力浦, 1982; 方润森等, 1985; 戎嘉余等, 1987; 金淳泰等, 1989; Tong等, 2001). 此外, 中国新疆塔里木盆地的柯坪塔格组、托克逊的塔勒克布拉克组、天山地区的志留系和缅甸

掸邦北部的Namhsim组(Pascoe, 1959; 刘洪福等, 1988; 王宝瑜, 1988; 王宝瑜等, 2001; 张师本等, 2001; 赵秀丽等, 2006)也有少量腕足类的产出.

2.2.8　鱼类

目前暂无青藏高原志留纪鱼类的报道, 相关研究主要都位于周边地区(Zhao和Zhu, 2010; 赵文金和朱敏, 2014). 新疆塔里木盆地兰多维列世的红层中产出2个组合, 其中塔塔埃尔塔格组合主要以盔甲鱼类(包括大庸鱼类及汉阳鱼类)和软骨鱼类中的中华棘鱼类的繁盛为特征, 依木干他乌组合主要以盔甲鱼类(包括汉阳鱼类及多鳃鱼类)和软骨鱼类(包括中华棘鱼类、蒙古鱼类及石阡鱼类)的繁盛为特征(王朴等, 1988; 王俊卿等, 1996; 赵文金等, 2009; Zhao和Zhu, 2010). 四川若尔盖的马尔组产出的庙沟组合主要以棘鱼类的繁盛为特征, 时代暂定为温洛克世侯墨期(王念忠等, 1998; Zhao和Zhu, 2010; 赵文金和朱敏, 2014). 罗德洛世晚期的鱼类动物群被命名为潇湘动物群, 可分为下部的扬子组合和上部的红庙组合, 扬子组合主要以硬骨鱼类基干类群、真盔甲鱼类、盾皮鱼类和棘鱼类的出现和繁盛为特征, 在研究区内分布于云南曲靖的关底组中下部, 而红庙组合以硬骨鱼类、棘鱼类和盾皮鱼类的繁盛为特征, 分布于关底组上部、妙高组及玉龙寺组下段(Gagnier等, 1989; 王念忠和董致中, 1989; Zhu等, 2009; Zhao和Zhu, 2010, 2015; 赵文金和朱敏, 2014; 蔡家琛等, 2020). 普里道利世的鱼类动物组合被命名为廖角山组合, 属于西屯动物群, 主要以硬骨鱼类和棘鱼类的繁盛为特征, 在研究区内分布于云南曲靖的玉龙寺组顶部(Zhao和Zhu, 2010; Zhao等, 2011). 此外, 泰国西北部的志留系也有鱼类的产出(Blieck等, 1984).

2.2.9　陆生植物

志留纪是陆生维管植物起源和演化的关键阶段. 迄今, 青藏高原仍只有少量志留纪陆生植物的报道, 大部分研究仍主要集中在青藏高原的周边地区. 云南保山的牛屎坪组上部的孢型化石丰富, 从中识别出*Apiculiretusispora spicula-Emphanisporites neglectus*组合, 时代为普里道利世(高联达, 1996; Zhang Y D等, 2014). 云南曲靖的玉龙寺组顶部产出的*Zosterophyllum qujingense*, 是研究区内唯一确凿的志留纪陆生维管植物的大化石记录(Hao等, 2007). 与此同时, 玉龙寺组顶部还发现了大量普里道利世的微体植物化石(方宗杰等, 1994; Tian等, 2011). 新疆塔里木盆地的柯坪塔格组和塔塔埃尔塔格组曾报道过少许兰多维列世的孢型植物化石(李军等, 1997; 张师本等, 2001; Wang等, 2023). 西昆仑的温泉沟群有少量志留纪早期的孢粉产出(高永利等, 2011). 云南墨江的漫波组识别出*Tetrahedraletes medinensis-Laevolancis chibrikovae-Ambitisporites avitus-dilutus*组合, 该组合以隐孢子为主, 并有三缝孢, 时代为兰多维列世晚期(Wang和Zhang, 2010). 云南绿春的水箐组识别出罗德洛统下部的孢粉组合(Liu F等, 2016). 甘肃迭部和四川若尔盖的南石门沟组曾报道过一些以三缝孢为主的微体植物化石(高联达和叶晓荣, 1987), 但后续研究指出, 南石门沟组岩性轻微变质, 获得的孢子较少, 不能反映其原有组合特征(王怿和徐洪河, 2009).

2.2.10　疑源类

青藏高原的志留纪疑源类研究程度相对较弱. 云南保山施甸的牛屎坪组上部、新疆叶城的温泉沟群中下部、甘肃迭部和四川若尔盖的南石门沟组均有志留纪疑源类的报道(高联达和叶晓荣, 1987; 高联达, 1996; Yao等, 2006). 在周边地区, 志留纪疑源类主要产出于云南曲靖的玉龙寺组上部、新疆塔里木盆地的柯坪塔格组和塔塔埃尔塔格组(邢裕盛, 1985; 李军等, 1997; 邢裕盛和方晓思, 1999; Tian等, 2011; 蔡习尧等, 2012), 以及印度库马盎专区东北部的Yong组(Sinha等, 1996, 1998; Sinha, 2008, 2022).

3　青藏高原及周边地区志留纪古地理特征

目前主流的志留纪全球古地理重建方案对于中国各板块的位置可谓达到了迥异的程度(图8; Scotese, 2014, 2021; Torsvik和Cocks, 2017; Dong等, 2021). 其中, 前两种方案(图8a、8b)截取自全球尺度的古地理重建(Scotese, 2014, 2021; Torsvik和Cocks, 2017), 而第三种方案(图8c)来自东亚地区的古地理重建(Dong等, 2021). 总体来说, 对于志留纪的中国各板块的古地理重建, 至少存在两点共识: (1) 华南板块位于赤道附近; (2) 羌塘、拉萨、特提斯喜马拉雅、印度、滇缅马苏(或滇缅马)等构成青藏高原的主要板块均位于冈瓦纳大陆或其边缘. 然而, 这三种古地理重建方案, 都各

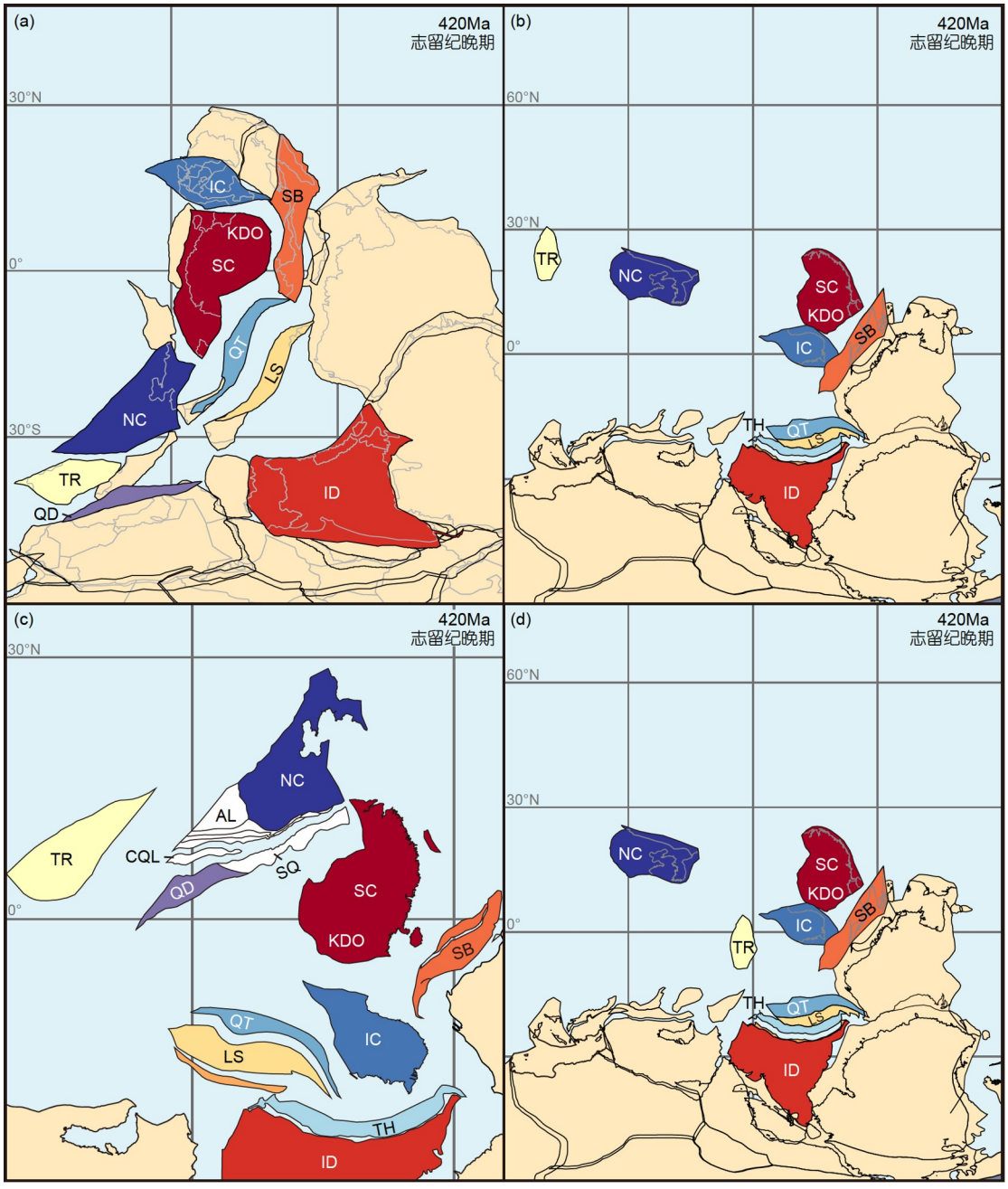

图 8　志留纪青藏高原及其周边古地理重建

SC, 华南(South China)板块; NC, 华北(North China)板块; TR, 塔里木(Tarim)板块; IC, 印支(Indochina)板块; SB, 滇缅马苏/滇缅马(Sibumasu/Sibuma)板块; QT, 羌塘(Qiangtang)板块; LS, 拉萨(Lhasa)板块; TH, 特提斯喜马拉雅(Tethyan Himalaya)板块; QD, 柴达木(Qaidam)板块; ID, 印度(India)板块; CQL, 中祁连(Central Qilian)板块; AL, 阿拉善(Alxa)板块; SQ, 南秦岭(South Qinling)板块; KDO, 康滇古陆(Kangdian Oldland); (a) 引自Scotese(2014, 2021); (b) 引自Torsvik和Cocks(2017); (c) 引自Dong等(2021); (d) 本研究结合古生物的最新证据, 基于Torsvik和Cocks(2017)的重建方案提出的修改建议

自存在着缺憾: Scotese(2014, 2021)对于原特提斯洋的定义似乎与其他学者都不太相同; Torsvik和Cocks(2017)尽管考虑到古生物地理分布在古地理重建中的重要性, 并且也贯彻到了其重建方案中, 但一些重要板

块, 如柴达木板块, 在其重建方案中是缺失的; Dong等(2021)看上去似乎是几种方案中最细致的, 但在其重建方案中, 并没有考虑到古生物地理分布在古地理重建中的重要性. 本文将对前人所开展的古生物地理研究进行梳理和总结, 并基于目前仅有的考虑了古生物地理分布重要性的Torsvik和Cocks(2017)方案, 提出一些修订的建议, 以供后续古地理重建参考.

Chen等(2017)在志留纪兰多维列世全球牙形动物群古地理分布特征的定量研究中指出, *Distomodus cathayensis*这个特征种在华南扬子区和西藏的同时发现, 表明这两个地区的牙形动物群存在一定的相似性. 然而, 华南扬子区兰多维列世的牙形动物群的层位比*Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides*带要低, 而西藏则以*Pterospathodus amorphognathoides amorphognathoides*带的动物群为主, 两个地区之间的动物群相似度究竟如何, 仍有待进一步探索.

陈均远(1983, 1984)和陈挺恩(1983)对我国志留纪头足动物群的古地理分布特征进行了分析, 并进行了头足类生物地理区的划分, 其中本文研究区被划分为藏-滇区和扬子区2个头足类生物地理区: 藏-滇区的头足类动物群组成单调, 以*Michelinoceras*及其亚属*Kopaninoceras*的繁盛为主要特征; 扬子区的头足类动物群组成则更丰富. 尽管这2个区的动物群迥异, 但各自都与欧洲地区有着不同程度的交流(陈均远, 1983, 1984). 与头足类分布模式相似的还有三叶虫和珊瑚. 根据项礼文(1984)对志留纪三叶虫的研究, 本文研究区被分别划入北方区、扬子区和滇西区3个三叶虫生物地理区, 其中北方区的三叶虫动物群以全球广布的*Encrinurus*为主要特征, 扬子区的三叶虫动物群则包含了较多的以王冠虫为代表的地方性属种, 而滇西区有限的资料表明其与欧洲地区同时代的三叶虫动物群具有较密切的联系. 我国志留纪珊瑚的古地理研究由来已久(Wang和Ho, 1981; 王鸿祯和何心一, 1983; 何心一, 1988; 李志明, 1989, 1990; 王鸿祯等, 1989; Wang和Chen, 1991; 何心一和陈建强, 1998, 2004, 2006; 王宝瑜, 1998). 尽管划分方案各异, 但整体上看本文研究区仍然被归入3个不同的皱纹珊瑚生物地理单元. 以王鸿祯等的研究为例, 分别为哈萨克斯坦-中朝区的天山-祁连亚区, 以及属于东南亚区的滇藏亚区和扬子亚区, 它们都属于东原特提斯大区, 其中天山-祁连亚区主要产*Crassilasma*、*Kodonophyllum*、*Kyphophyllum*、*Nanshanophyllum*、*Onychophyllum*、*Phaulactis*、*Protopilophyllum*、*Tungussophyllum*和*Yassia*, 滇藏亚区主要产*Amplexoides*、*Holmophyllum*、*Microplasma*和*Pilophyllum*, 而扬子亚区的物种则非常丰富(王鸿祯等, 1989; Wang和Chen, 1991).

头足类的古生物地理研究表明, 滇藏地区和扬子地区之间在志留纪存在地理隔离: 头足类*Michelinoceras*及其亚属*Kopaninoceras*广泛分布在冈瓦纳大陆上, 包括滇藏地区、欧洲南部的波西米亚地区、卡尔尼克阿尔卑斯地区和非洲北部的小阿特拉斯山地区等地(Chen等, 2022); 然而在扬子地区, 无论是志留纪早期的四川角石动物群, 还是志留纪晚期云南曲靖发育的一系列头足类动物群, 均无*Michelinoceras*及其亚属*Kopaninoceras*的产出记录(陈均远等, 1981). 陈挺恩(1983)认为, 滇藏地区在志留纪与同属冈瓦纳大陆的欧洲南部和非洲北部等地均位于同一海盆, 而这一古海与扬子古海之间可能受到了康滇古陆的阻隔, 造成两个古海之间的生物无法充分交流. 这也得到了三叶虫和皱纹珊瑚的古生物地理研究的印证.

华南、塔里木和印支板块间在志留纪应该存在密切的联系, 有以下三点证据: 第一, 志留纪可识别出一个鱼类生物地理区——泛华夏盔甲鱼类区, 该区内的动物群地区性强、特征明显, 只发现于中国的华南和塔里木板块, 以及印支板块(赵文金, 2005; Zhao和Zhu, 2010); 第二, 志留纪早期, 印支板块的孢型植物组合与华南、塔里木具有一定的相似性(王怿, 2010); 第三, 在这三大板块上, 都发现了生活在浅水(BA2~3)的*Retziella*腕足动物群(Rong等, 1995).

盔甲鱼被认为营底栖滤食性生活, 运动能力不强, 主要生活在靠近古陆边缘的三角洲、海湾地带和陆相淡水盆地中(刘玉海, 1985; 潘江和曾祥渊, 1985). 盔甲鱼的迁移扩散能力有限, 陆地和海洋均可成为其迁移的障碍. 因此"泛华夏盔甲鱼类区"的识别表明, 在志留纪, 华南、塔里木和印支板块可能处于一个与全球其他地区相对隔离的位置, 并且这三者之间有着密切的关系(赵文金, 2005; 山显任等, 2022). 孢型化石代表的早期陆生植物个体细小, 主要生活在潮湿的近岸或内陆地带, 易被风、河流和洋流所搬运, 但搬运距离不会太远(王怿, 2010). 志留纪早期的孢型植物化石研究表明, 塔里木板块和华南板块可能分布于赤道附近, 而印支板块和华南板块可能处于同一气候带(王怿,

2010), 而这一时期, 塔里木板块与冈瓦纳大陆西缘也存在密切联系(Wang等, 2023). 而作为海相的*Retziella*浅水腕足动物群在这三大板块的同时发现(Rong等, 1995), 更加为这样的推测提供了有力的证据. 此外, 华南和塔里木两大板块之间的密切联系, 还可以根据海相红层的发育来进行推断(戎嘉余等, 2019).

然而, 无论是本文所讨论的Torsvik和Cocks(2017)的重建方案(图8b), 还是其他学者的重建方案(图8a、8c; Scotese, 2014, 2021; Dong等, 2021), 均仅将华南板块和印支板块放在了相邻的位置. 对于塔里木板块, 则通常用华北板块将其与华南板块隔开. 这似乎不太符合基于鱼类、陆生植物和腕足类的认识. 华北板块受到了怀远运动第二幕的影响, 缺失奥陶系凯迪阶上部至泥盆系的沉积(Zhen等, 2016), 因此, 华北板块志留系的数据是缺失的, 是否应该将其置于塔里木板块与华南板块之间, 还有待商榷. 至少来自古生物学的证据表明, 塔里木板块可能应该更靠近华南和印支两个板块(图8d).

4 重大地质事件

4.1 志留纪早期缺氧事件与黑色页岩

显生宙以来的第一次冰期发生于晚奥陶世晚期, 随后在志留纪早期发生了大规模的海洋缺氧事件, 这次缺氧事件在不同板块的大陆边缘盆地均留下了典型的富有机质页岩沉积(张俊鹏等, 2022). 在华南的扬子区, 奥陶系最顶部至志留系兰多维列统中下部为一套富含有机质的黑色含笔石页岩, 这套黑色页岩被认为是全球海平面快速上升所带来的大规模缺氧事件的产物(戎嘉余等, 2019). 这套页岩在中、上扬子区被称为龙马溪组, 连同其下的五峰组, 是我国重要的烃源岩, 其中产出大量页岩气(邹才能等, 2021). 陈旭等(2015)根据龙马溪组露头剖面和井下岩芯的笔石生物地层的最新研究结果, 提出龙马溪组的*Metabolograptus persculptus*笔石带至*Demirastrites triangulatus*笔石带下部是页岩气勘探的有利层位, 并且在整个扬子区的覆盖区圈定出6个有利页岩气开发的区块.

在青藏高原及其周边的部分地区, 志留系的下部也发育了一套含笔石的页岩、泥岩和粉砂岩, 其中较完整地囊括了上述笔石带的地层主要包括云南保山的仁和桥组和西藏申扎的德悟卡下组(Mu和Ni, 1983; 倪寓南, 1986; Zhang Y D等, 2014). 云南保山的仁和桥组为黑色、灰黑色含笔石页岩、粉砂质页岩和少量硅质页岩(图9a), 厚度为100~400m, 其中黑色页岩部分厚度为43~212m(陈志柱等, 2014; Zhang Y D等, 2014; 李遇, 2017). 西藏申扎的德悟卡下组为灰黑色笔石页岩、泥岩和灰岩互层, 厚度为156~233m(倪寓南, 1986; 夏代祥和刘世坤, 1997; 张树岐等, 2003).

此外, 西藏聂拉木-定日一带的石器坡组、云南大关和四川布拖的龙马溪组也部分发育上述笔石带, 且缺失不多. 西藏聂拉木-定日一带的石器坡组为灰黑色页岩、粉砂岩(图9b), 厚度为12~181m(穆恩之和倪寓南, 1975; 穆恩之和陈挺恩, 1984; Mu和Ni, 1985; 夏代祥和刘世坤, 1997). 云南大关和四川布拖的龙马溪组为黑色、灰黑色钙质泥岩及粉砂岩(叶少华等, 1983; 王怿等, 2014; 张娣等, 2022).

云南保山地区仁和桥组的页岩气成藏研究目前还处于初步阶段. 研究表明, 仁和桥组的黑色页岩展布稳定, 有机质丰度高, 岩石成熟度高, 有机质类型好, 演化程度高, 裂缝发育, 具备页岩气藏的形成条件(陈志柱等, 2014); 对储层特征的研究表明, 仁和桥组页岩具备优质的储集条件和较强的吸附能力(李遇, 2017); 对有机质富集因素的研究表明, 仁和桥组沉积期为温暖湿润气候, 化学风化强烈, 陆源输入增加, 以及缺氧至贫氧的沉积环境, 有利于有机质的形成、富集和保存(王瑶琳等, 2022). 同样处于研究初步阶段的还有四川西部的西昌盆地. 由于该地区勘探程度较低, 前期积累的基础地质资料薄弱, 对盆地内烃源岩的发育程度仍不确定, 严重制约了该地区的油气勘探进程(吴长江等, 2019; 李轲等, 2021). 近年来, 在西昌盆地开展的页岩气保存条件的研究结果表明, 布拖是西昌盆地中页岩气勘探开发最具潜力的区块(李轲等, 2021; 李桃等, 2021). 位于扬子台地西缘的滇东北地区的页岩气勘探则取得了巨大的进展, 该地区的昭通页岩气示范区已成为国内继长宁-威远、焦石坝之后第三大页岩气生产基地(梁兴等, 2022).

而西藏申扎地区和聂拉木地区, 根据岩性和地层发育情况, 可以推断这两个地区的志留系具有一定程度的页岩气勘探开发的潜力, 但由于高原工作的不易, 目前这两个地区并无页岩气成藏方面的研究. 未来需要重点关注青藏高原志留系优质页岩层段的空间展布情况, 并进行资源量的预测.

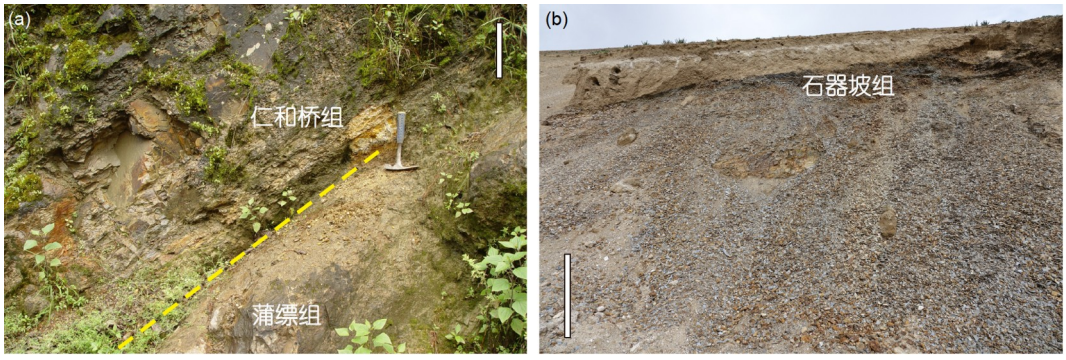

图 9　青藏高原及其周边志留系底部黑色页岩

(a) 云南保山老尖山剖面仁和桥组底部黑色页岩, 与下伏蒲缥组呈平行不整合接触关系, 比例尺为30cm; (b) 西藏聂拉木亚来剖面石器坡组露头远观, 比例尺为10m

4.2　海相红层与全球事件

红层的发育代表了还原、缺氧环境被氧化条件的替代, 而异地并近乎等时的海相红层可能代表了对全球事件的响应(戎嘉余等, 2019). 中国的志留系自下而上发育了3套海相红层, 均以紫红色与黄灰绿色碎屑岩互层为特征, 时代分别为特列奇早期、特列奇中晚期和卢德福特晚期至普里道利世早期, 为近岸浅海的产物, 广泛分布在青藏高原的周边地区, 包括华南扬子、塔里木和祁连山等地(戎嘉余等, 2012, 2019). 这些红层的分布特点表明当时存在古陆, 并且其上发育了足够规模的河流. 伴随着地壳抬升后强烈的剥蚀作用, 为红层的沉积提供了富含高价铁的物源. 由于彼时沉积和埋藏速度快, 海域有机质含量偏低, 水动力较弱, 底质界面呈氧化状态, 为大规模红层发育提供了条件(Rong等, 2003; 戎嘉余等, 2012; Zhang X L等, 2014; Liu J B等, 2016). 特列奇早期的下红层的沉积很可能与全球海平面下降以及温度降低有关(戎嘉余等, 2012; McLaughlin等, 2012; Liu J B等, 2016), 而特列奇中晚期的上红层则沉积于全球气候回暖、水体氧化加剧之时(McLaughlin等, 2012).

与周边地区相比, 青藏高原志留系海相红层的研究程度较弱, 直到近年来, 李明等(2019)才首次对西藏自治区的志留系海相红层的序列进行了系统梳理, 认为总共可以识别出5层海相红层, 分布于西藏南部定结-聂拉木一带和西藏北部申扎一带, 层位主要位于普鲁组下部、德悟卡下组中部和扎弄俄玛组顶部, 时代分别为鲁丹中期、鲁丹晚期至埃隆早期、申伍德期、侯墨期和普里道利世. 不同于扬子等地广泛存在的以碎屑岩相沉积为主的近岸浅海红层, 西藏志留系的海相红层的岩性是多样的, 包括页岩、粉砂质页岩、石英砂岩、灰岩、泥质灰岩、白云质灰岩和白云岩等(李明等, 2019). 无论是岩性还是时代分布, 西藏志留系的海相红层均与周边地区存在一定程度的差异, 但西藏志留系的海相红层与全球事件, 如海平面变化、温度变化以及海水氧化还原条件变化等因素之间的关系仍有待更系统和深入的研究.

4.3　碳同位素漂移事件

海相沉积物的碳同位素组成既可以反映古海洋生产力的强弱, 又能够指示古大气中二氧化碳的含量, 因此研究中往往将碳同位素组成变化作为指示古环境变化的指标之一(李超等, 2018). 此外, 海相碳酸盐岩的无机碳同位素记录还可以很好地用于地层对比(Allan和Matthews, 1977; Scholle和Arthur, 1980). 在志留纪, 全球气候呈现出反复多变的特点, 伴随的是多次发生的$\delta^{13}C_{carb}$漂移(图10). 近几年, 志留系的碳同位素地层学的研究正逐渐成为热点, 但主要都集中在青藏高原的周边地区.

王怿等(2016)在四川盐边识别出兰多维列统上部至罗德洛统下部的$\delta^{13}C_{carb}$连续曲线, 并从中识别出温洛克世的2次碳同位素正漂移, 分别对应于申伍德早期的Ireviken事件和侯墨中期的Mulde事件; Yan等(2022)重新研究了该地区的$\delta^{13}C_{carb}$特征, 结合其中的牙形刺, 厘定了该地区Ireviken事件在剖面上的位置, 将此前王怿等(2016)识别出的Ireviken事件厘定为特列奇中期的Manitowoc事件, 此外还识别出了特列奇早期

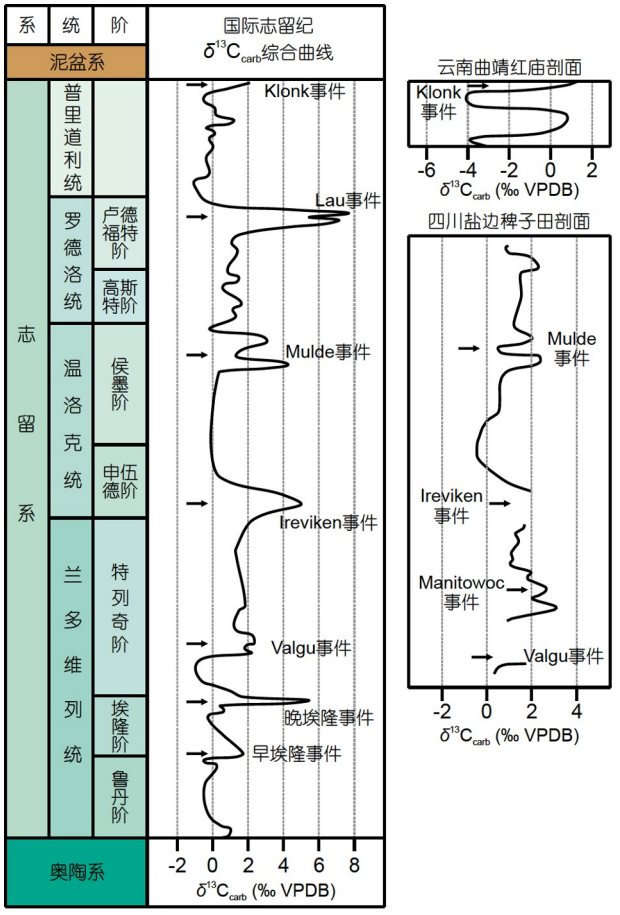

图 10　青藏高原周边地区志留纪$\delta^{13}C_{carb}$变化曲线及其与国际志留纪$\delta^{13}C_{carb}$综合曲线的对比

国际志留纪$\delta^{13}C_{carb}$综合曲线参考自Melchin等(2020); 四川盐边稗子田剖面$\delta^{13}C_{carb}$曲线参考自王怿等(2016)和Yan等(2022); 云南曲靖红庙剖面$\delta^{13}C_{carb}$曲线参考自Zhang Y D等(2014)

的Valgu事件的一部分(图10). 云南曲靖妙高组至玉龙寺组的$\delta^{13}C_{carb}$连续曲线指示志留系顶界位置可能不在玉龙寺组顶部, 而应位于更高的层位中, 这与同剖面化石门类(陆生植物、疑源类、牙形刺等)的研究结果是大致相符的(图10; Zhang Y D等, 2014), 而来自云南宜良玉龙寺组顶部至西山村组的$\delta^{13}C_{carb}$、$\delta^{13}C_{org}$和TOC变化曲线, 尤其是Klonk事件起点的位置, 则指示志留系顶界的位置应位于西山村组底界之上(Zhao等, 2021). 西秦岭的$\delta^{13}C_{org}$变化曲线指示志留系与泥盆系的界线位置可能临近南石门沟组顶部(Zhao等, 2010, 2011).

尽管过去在环境指示、碳同位素漂移事件的识别以及志留-泥盆系界线研究中, 化学地层学都起到了重要的作用, 但不难看出, 青藏高原及其周边的化学地层学研究仍处于起步阶段, 还有待进一步提高. 尤其是在青藏高原周边地区, 志留系大多发育不全(图3), Valgu事件和Ireviken事件均未能完整识别, Lau事件所在的层位更是整体缺失(图10). 相比之下, 青藏高原, 主要是西藏和滇西地区的志留系发育较完整(图2; Zhang Y D等, 2014; Chen等, 2020, 2022), 更有潜力补充和完善我国志留纪的碳同位素地层学研究.

事实上, 针对西藏和滇西这两个区域, 已有少量的初步研究. 袁桃(2017)根据西藏申扎地区5118高地剖面的$\delta^{13}C_{carb}$研究, 在德悟卡下组顶部至扎弄俄玛组底部识别出了1次变化幅度为+6.3‰的$\delta^{13}C_{carb}$正漂移, 认为这次正漂移对应于罗德洛世卢德福特中期的Lau事件. Lau事件时期的碳同位素漂移在国际上被认为是显生宙幅度最大的碳同位素正漂移之一, 其漂移幅度平均可达+5‰~+8‰, 最高可达+12‰(Calner, 2008). 其重要性还在于Lau事件被认为是地史时期第十大的生物灭绝事件, 在这次事件中, 23%的海洋生物属级单元遭到了灭绝(Jeppsson等, 2012; Bond和Grasby, 2017), 受到波及的门类包括牙形动物、笔石、疑源类、腕足类、鱼类等(Bowman等, 2019). 尽管在生物多样性受创量级上略小于显生宙五次大灭绝事件(Sepkoski, 1984), 但Lau事件对生物和环境演化等方面造成的影响却表现出与后者相似的特征, 如劫后泛滥动物群的出现和潮下皱纹构造等错时相的复兴等(Talent等, 1993; Calner, 2005; Jeppsson, 2005). 因此, 袁桃(2017)对Lau事件的识别则显得非常重要, 但是真实情况是否如此仍需商榷: 一方面, 申扎地区的志留系的牙形刺研究还不够完善, 袁桃(2017)所引用的牙形刺鉴定名单中的关键分子(尤其是*Kockelella variabilis*和*Ozarkodina crispa*)所出现的顺序并不符合目前国际上的最新认识; 另一方面, 申扎地区的扎弄俄玛组中识别出了罗德洛统卢德福特阶下部的牙形刺带化石*Polygnathoides siluricus*(林宝玉和邱洪荣, 1983; 邱洪荣, 1985, 1988; 喻洪津, 1985; 王成源等, 2004; 郑春子, 2005; 曲永贵等, 2011), 而袁桃(2017)所识别出的$\delta^{13}C_{carb}$正漂移的高值均位于德悟卡下组最顶部的灰紫色页岩中, 也就是说, Lau事件出现的层位比牙形刺*Polygnathoides siluricus*要低, 这显然与来自全球其他地区的认识相矛盾(Jeppsson等, 2012). 因此可以初步推断, 袁桃(2017)所描述的这次$\delta^{13}C_{carb}$正漂移很可能

并不是Lau事件所对应的$\delta^{13}C_{carb}$正漂移. 但它究竟代表了哪次事件, 扎弄俄玛组最高到底能达到什么层位, 以及申扎地区是否能完整识别出Lau事件, 这些问题都需要未来通过更大量和更高分辨率的样品分析来进行明确. 潘明等(2020)根据在云南保山西邑芭蕉箐剖面的$\delta^{13}C_{carb}$连续变化曲线识别出了3次正漂移, 认为其中的第1次正漂移对应于Lau事件. 然而实际上, 这次正漂移所在的层位中所产出的笔石和海百合类化石并不能提供精确的年代意见, 仅能进行大致的时代约束; 此外, 这次正漂移仅有一个数据点作为支撑(潘明等, 2020), 其可靠性仍存疑. 因此, 在云南保山地区是否能准确地识别出这次正漂移, 还有待未来开展更系统、分辨率更高的生物地层学与化学地层学研究工作.

5　结论

基于青藏高原及其周边志留系的研究, 可以总结出6点结论.

(1) 中国青藏高原及其周边的志留系可以划分为4个地层区: 西藏-滇西-川西地层区、昆仑-祁连地层区、华南地层区和塔里木地层区. 与周边地区相比, 青藏高原大部分地区志留系地层发育完整.

(2) 青藏高原及其周边的志留系总共可以识别出24个笔石带和16个牙形刺带. 青藏高原的笔石、牙形刺和头足类等3个门类的研究程度较高. 其余门类的研究则主要集中在周边地区.

(3) 组成青藏高原的各板块在志留纪位于冈瓦纳大陆边缘, 与华南、华北和塔里木等其他板块间存在一定的距离. 来自鱼类、陆生植物、腕足类的证据表明, 华南、塔里木和印支板块间在志留纪应该存在密切的联系.

(4) 从地层发育情况和岩性特征来看, 青藏高原志留系底部的黑色页岩有潜力成为我国未来页岩气勘探开发研究的方向, 需要进一步开展黑色页岩时限、分布和资源量等方面的研究.

(5) 青藏高原志留系海相红层在岩性和时代分布上, 与扬子地区均存在一定程度的差异, 而其与全球事件之间的关系还有待更系统和深入的研究.

(6) 与周边其他地区相比, 青藏高原的志留系发育完整, 需要进一步在西藏和滇西地区开展研究, 有潜力补充和完善我国志留纪的碳同位素地层学研究, 建立属于我国的较完整的志留纪碳同位素曲线.

致谢　感谢沈树忠院士及评审专家审阅文稿, 并提出宝贵修改意见. 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)的成果之一.

参考文献

艾永亮, 王小玉, 王世炎, 陈瑞保, 杨荣华. 2008. 西昆仑西段温泉沟组浅变质地层中的笔石动物群. 河南理工大学学报(自然科学版), 27: 253–263

安太庠. 1987. 中国南部早古生代牙形石. 北京: 北京大学出版社. 238

安太庠, 郑昭昌. 1990. 鄂尔多斯盆地周缘的牙形石. 北京: 科学出版社. 201

蔡家琛, 赵文金, 朱敏. 2020. 云南曲靖志留纪含鱼地层关底组的划分与时代. 古脊椎动物学报, 58: 249–266

蔡土赐. 1984. 新疆奥陶纪、志留纪四射珊瑚特征及其地质地理分布. 新疆地质, 2: 47–57

蔡习尧, 毛树华, 陈跃, 邹元荣, 陈强路, 尤东华. 2005. 塔里木盆地顺1井几丁石发现的意义. 新疆石油地质, 26: 536–539

蔡习尧, 窦丽玮, 王怿, 唐鹏, 张智礼, 魏玲, 成俊峰. 2012. 塔里木盆地沙雅隆起托甫2井志留系划分对比. 岩石学报, 28: 2584–2590

曹宣铎, 欧阳萱. 1987. 西秦岭碌曲、迭部地区晚志留世-泥盆纪四射珊瑚. 见: 地质矿产部西安地质矿产研究所, 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 西秦岭碌曲、迭部地区晚志留世与泥盆纪地层古生物(上册). 南京: 南京大学出版社. 139–202

陈均远. 1975. 珠穆朗玛峰地区的鹦鹉螺化石. 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(第一分册). 北京: 科学出版社. 267–294

陈均远. 1983. 志留纪头足类区系特征. 见: 古生物学基础理论丛书编委会, 主编. 中国古生物地理区系. 北京: 科学出版社. 43–52

陈均远. 1984. 鹦鹉螺类. 见: 林宝玉等, 主编. 中国地层, 6, 中国的志留系. 北京: 地质出版社. 204–207

陈均远, 刘耕武, 陈挺恩. 1981. 华中及西南地区志留纪鹦鹉螺动物群. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 13: 1–104

陈挺恩. 1981. 西藏一些鹦鹉螺化石. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 西藏古生物(第三分册). 北京: 科学出版社. 261–282

陈挺恩. 1983. 西藏奥陶-志留纪头足类生物区系特征兼论大陆漂移的一些问题. 地层古生物, 11: 18–23

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

陈旭, 戎嘉余. 1988. 亚洲东部的志留系. 现代地质, 2: 328–341

陈旭, 戎嘉余. 1996. 中国扬子区兰多维列统特列奇阶及其与英国的

对比. 北京: 科学出版社. 162
陈旭, 方宗杰, 耿良玉, 王宗哲, 廖卫华, 夏凤生, 乔新东. 1990. 志留系. 见: 周志毅, 陈丕基, 主编. 塔里木生物地层和地质演化. 北京: 科学出版社. 131–157
陈旭, 樊隽轩, 张元动, 王红岩, 陈清, 王文卉, 梁峰, 郭伟, 赵群, 聂海宽, 文治东, 孙宗元. 2015. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定. 地层学杂志, 39: 351–358
陈旭, 于深洋, 方翔, 李文杰, Muir L, 张元动. 2022. 西藏南部聂拉木志留纪笔石新材料. 古生物学报, 61: 525–540
陈志柱, 张宗羲, 杨楠, 白鹏. 2014. 保山地区下仁和桥组页岩气成藏条件分析. 云南地质, 33: 180–184
程立人, 陈寿铭, 张以春. 2007. 藏北羌塘南部发现早古生代地层及意义. 地球科学——中国地质大学学报, 32: 59–62
邓占球. 1982. 西藏古生代床板珊瑚和日射珊瑚. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 西藏古生物(第四分册). 北京: 科学出版社. 97–106
邓占球. 1986. 申扎中志留世、早泥盆世床板珊瑚. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 10: 157–167
邓占球. 1997. 塔里木及其邻区志留纪、泥盆纪珊瑚. 古生物学报, 36(增刊): 116–130
邓占球, 章炎生. 1985. 横断山脉古生代珊瑚. 见: 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, 主编. 川西藏东地区地层与古生物, 第四册. 成都: 四川人民出版社. 1–102
董得源. 1984. 志留系. 见: 文世宣, 章炳高, 王义刚, 孙东立, 董得源, 尹集祥, 吴浩若, 陈楚震, 王玉净, 何国雄, 穆西南, 耿国仓, 廖卫华, 陈挺恩, 郭师曾, 主编. 西藏地层. 北京: 科学出版社. 305–306
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
方润森, 江能人, 范建才, 曹仁关, 李代芸. 1985. 云南曲靖地区中志留世-早泥盆世地层及古生物. 昆明: 云南人民出版社. 171
方宗杰, 蔡重阳, 王怿, 李星学, 高联达, 王成源, 耿良玉, 王尚启, 王念忠, 李代芸. 1994. 滇东曲靖志留-泥盆系界线研究的新进展. 地层学杂志, 18: 81–90
付建刚, 梁新权, 王策, 蒋英, 周云, 潘传楚, 钟永生, 杨永强, 王泽利. 2014. 柴北缘锡铁山滩涧山群c岩性组的时代归属及其物源特征. 地质学报, 88: 1081–1092
傅力浦. 1982. 腕足动物门. 见: 地质矿产部西安地质矿产研究所, 主编. 西北地区古生物图册, 陕、甘、宁分册, (一)前寒武纪-早古生代部分. 北京: 地质出版社. 95–179
傅力浦, 李跃西, 宋礼生, 温玉领. 1983. 西秦岭的志留系. 地层学杂志, 7: 258–271
甘肃省地质矿产局区调队. 1986. 西秦岭南坡的志留系. 甘肃地质, 5: 33–62
高联达. 1996. 云南施甸晚志留世-早泥盆世孢子和疑源类. 地球学报, 17: 105–112
高联达, 叶晓荣. 1987. 西秦岭碌曲-迭部地区晚志留世至泥盆纪微体古植物. 见: 地质矿产部西安地质矿产研究所, 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 西秦岭碌曲、迭部地区晚志留世与泥盆纪地层古生物(下册). 南京: 南京大学出版社. 379–450
高永利, 石晨霞, 方怀宾, 卢书伟, 李春艳, 李瑞强. 2011. 西昆仑琼恰特一带温泉沟群地层划分. 新疆地质, 29: 393–397
葛梅钰, 郑昭昌, 李玉珍. 1990. 宁夏及其邻近地区奥陶纪、志留纪笔石地层及笔石群. 南京: 南京大学出版社. 190
耿良玉, 王玥, 张允白, 蔡习尧, 钱泽书, 丁连生, 王根贤, 刘春莲. 1999. 扬子区后Llandovery世(志留纪)胞石的发现及其意义. 微体古生物学报, 16: 111–151
郭勇岭, 甘克文. 1958. 甘肃中宁附近志留系的新发现. 科学通报, 9: 96
何心一. 1988. 志留纪. 见: 殷鸿福等, 主编. 中国古生物地理学. 武汉: 中国地质大学出版社. 111–133
何心一. 1990. 阿里志留纪、泥盆纪珊瑚化石. 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. 33–36
何心一, 陈建强. 1998. 扬子区奥陶纪和志留纪四射珊瑚的起源、扩散及生物古地理关系. 现代地质, 12: 151–159
何心一, 陈建强. 1999. 西秦岭迭部地区早志留世四射珊瑚动物群. 古生物学报, 38: 423–434
何心一, 陈建强. 2004. 滇东曲靖地区晚志留世四射珊瑚动物群. 古生物学报, 43: 303–324
何心一, 陈建强. 2006. 扬子区奥陶纪、志留纪四射珊瑚分类、生物地层与生物古地理新认识. 地学前缘, 13: 145–152
何原相, 钱咏臻. 2000. 四川盐边稗子田志留系与泥盆系的界线划分及地质意义. 沉积与特提斯地质, 20: 98–112
胡长寿. 1991. 西藏盐井地区志留纪-早泥盆世地层及其意义. 中国区域地质, 10: 282–284
黄枝高, 鲁艳敏. 1983. 西藏高原申扎地区早志留世笔石群及其意义. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(2), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 121–169
黄柱熙, 程立人. 1988. 藏北班戈、申扎地区志留纪和泥盆纪珊瑚及其意义. 长春地质学院学报, 18: 249–257
计文化, 陈守建, 李荣社, 王训练. 2014. 青藏高原及邻区古生代构造-岩相古地理综合研究. 武汉: 中国地质大学出版社. 381
金淳泰, 叶少华, 江新胜, 李玉文, 喻洪津, 何原相, 易庸恩, 潘云唐. 1989. 四川二郎山地区志留纪地层及古生物. 中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊, 11: 1–224
金淳泰, 钱泳蓁, 王吉礼. 2005. 四川盐边地区志留纪牙形石生物地层及年代地层. 地层学杂志, 29: 281–294
金玉玕, 孙东立. 1981. 西藏古生代腕足动物群. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 西藏古生物(第三分册). 北京: 科学出版社. 127–176
黎敦朋, 樊晶, 肖爱芳, 周小康, 李新林, 杜少喜. 2002. 东昆仑西段祁漫塔格群早志留世笔石化石的发现. 地质通报, 21: 136–139
黎敦朋, 李静, 张汉军, 李新林, 周小康, 杜少喜. 2003. 东昆仑祁漫塔

格山志留系白干湖组浊积岩特征. 陕西地质, 21: 39–44
李超, 樊隽轩, 孙宗元. 2018. 奥陶系无机碳同位素地层学综述. 地层学杂志, 42: 408–428
李峰, 吴志亮, 李保珠, 汪林峰. 2006. 柴达木盆地北缘滩间山群新厘定. 西北地质, 39: 83–90
李军, 朱怀诚, 方宗杰. 1997. 新疆柯坪志留系塔塔埃尔塔格组微体化石. 古生物学报, 36(增刊): 136–143
李轲, 陈杨, 牟必鑫, 李金玺, 李智武, 童旭, 华天, 刘升武. 2021. 西昌盆地南部地区志留系龙马溪组页岩气保存条件的评价. 非常规油气, 8: 34–42
李明, 林宝玉, 宋妍妍. 2019. 西藏奥陶纪和志留纪海相红层的分布与时代. 地球学报, 40: 428–446
李桃, 杨贵来, 何伟, 陈杨, 周瑞琦, 牟必鑫, 魏洪刚. 2021. 西昌盆地五峰组-龙马溪组页岩气保存条件研究. 沉积与特提斯地质, 41: 465–476
李学森, 程立人. 1988. 藏北申扎、班戈地区奥陶纪和志留纪的一些头足类化石. 长春地质学院学报, 18: 241–248
李遇. 2017. 滇西地区下仁和桥组页岩气储层特征. 见: 云南省地质学会, 主编. 云南省首届青年地质科技论坛优秀学术论文集. 昆明: 云南省科学技术协会. 51–57
李志明. 1989. 中国奥陶纪至泥盆纪横板珊瑚组合与生物古地理. 见: 王鸿祯, 何心一, 陈建强等, 主编. 中国古生代珊瑚分类演化及生物古地理. 北京: 科学出版社. 299–318
李志明. 1990. 新疆及邻区奥陶纪、志留纪生物古地理. 见: 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培等, 主编. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社. 286–300
李忠雄, 钱咏臻. 2001. 扬子地台西缘志留系牙形刺研究新进展. 沉积与特提斯地质, 21: 87–99
梁寿生, 夏金宝. 1978. 藏北志留系新知. 古生物学报, 17: 99–100
梁兴, 单长安, 王维旭, 李兆丰, 朱斗星, 徐进宾, 张卓, 张朝, 罗瑀峰, 袁晓俊. 2022. 昭通国家级页岩气示范区勘探开发进展及前景展望. 天然气工业, 42: 60–77
林宝玉. 1981. 西藏申扎地区古生代地层的新认识. 地质论评, 27: 353–354
林宝玉. 1983. 西藏申扎地区古生代地层. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(8), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 1–13
林宝玉. 1989. 志留系. 见: 林宝玉, 王乃文, 王思恩, 刘桂芳, 邱洪荣, 主编. 喜马拉雅岩石圈构造演化, 西藏地层. 北京: 地质出版社. 20–40
林宝玉, 邱洪荣. 1982. 西藏喜马拉雅地区古生代地层的新认识. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(7), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 149–152
林宝玉, 邱洪荣. 1983. 西藏的志留系. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(8), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 15–28
林宝玉, 苏养正, 朱秀芳, 戎嘉余. 1998. 中国地层典, 志留系. 北京: 地质出版社. 104
刘洪福, 蒋克渝, 车自成, 韩天儒, 袁祖银. 1988. 天山中段托克逊县可可乃克地区早志留世地层的发现及其生物群特征. 新疆地质, 6: 27–40
刘玉海. 1985. 盔甲鱼*Antiquisagittaspis cornuta* (新属、新种)在广西六景下泥盆统的发现. 古脊椎动物学报, 23: 247–254
刘玉海, 朱敏, 林翔鸿, 卢立伍, 盖志琨. 2019. 新疆塔里木盆地志留纪盔甲鱼类新知. 古脊椎动物学报, 57: 253–273
吕勇, 山克强, 谢运球, 尹福光, 胡志鹏, 肖玲, 廖家飞. 2014. 滇西潞西(芒市)的奥陶系和志留系. 地层学杂志, 38: 161–169
穆恩之, 张有魁. 1964. 祁连山东部奥陶纪及志留纪笔石地层. 中国科学院地质古生物研究所集刊, 地层文集, 1:1–20
穆恩之, 倪寓南. 1975. 珠穆朗玛峰地区志留纪及泥盆纪笔石. 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(第一分册). 北京: 科学出版社. 5–27
穆恩之, 陈挺恩. 1984. 西藏南部志留纪地层的新材料. 地层学杂志, 8: 49–55
穆恩之, 尹集祥, 文世宣, 王义刚, 章炳高. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区的地层. 地质科学, 8: 13–36
倪寓南. 1986. 西藏申扎、班戈古生代及白垩纪地层: 三、志留系. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 10: 13–22
倪寓南. 1997. 云南施甸志留纪霍梅晚期(Late Homerian)笔石. 古生物学报, 36: 310–320
倪寓南, 林尧坤. 2000. 云南施甸志留纪上人和桥组笔石. 古生物学报, 39: 343–355
倪寓南, 宋礼生. 2002. 西北地区志留纪温洛克世晚期-罗德洛世早期的一些笔石. 古生物学报, 41: 361–371
倪寓南, 陈挺恩, 蔡重阳, 李国华, 段彦学, 王举德. 1982. 云南西部的志留系. 古生物学报, 21: 119–132
潘建, 李贵义, 李广铁. 2019. 青海省巴龙贡噶尔组的重新划分及地质意义. 世界地质, 38: 900–909
潘江, 曾祥渊. 1985. 湘西早志留世溶溪组无颌类的发现及其意义. 古脊椎动物学报, 23: 207–213
潘明, 郝彦珍, 孙成杰, 吕勇, 山克强. 2020. 云南保山普里道利统沉积特征及其对冈瓦纳北缘古海洋环境的指示. 地质学报, 94: 1382–1396
青海省地层表编写小组. 1980. 西北地区区域地层表, 青海省分册. 北京: 地质出版社. 277
青海省第一区域地质测量队. 1976. 1/20万快日玛乡幅(J-47-21)区域地质调查报告. 青海省地质局
邱洪荣. 1985. 西藏志留纪牙形石. 中国地质科学院地质研究所所刊, 11: 23–36
邱洪荣. 1988. 西藏早古生代牙形石生物地层. 地层古生物论文集, 19: 185–202
曲永贵, 王永胜, 段建祥, 张树岐, 王忠恒, 吕鹏, 刘贵忠, 李学彬, 冯

德臣, 谢元和, 于喜文, 姜雪飞, 孙中纲, 李庆武, 梁世福, 王洪双, 郭双山, 郑春子. 2011. 中华人民共和国区域地质调查报告, 比例尺1:250000, 多巴区幅(H45C001004). 武汉: 中国地质大学出版社. 273

戎嘉余, 杨学长. 1980. 滇东曲靖上志留统妙高组腕足化石群. 古生物学报, 19: 263–288

戎嘉余, 杨学长. 1981. 简论滇东的志留纪地层. 地层学杂志, 5: 64–67

戎嘉余, 张研, 陈秀琴. 1987. 西秦岭碌曲-迭部地区志留系-泥盆系界线地层的腕足类化石群. 见: 地质矿产部西安地质矿产研究所, 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 西秦岭碌曲、迭部地区晚志留世与泥盆纪地层古生物(下册). 南京: 南京大学出版社. 1–94

戎嘉余, 王怿, 张小乐. 2012. 追踪地质时期的浅海红层——以上扬子区志留系下红层为例. 中国科学: 地球科学, 42: 862–878

戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 樊隽轩, 黄冰, 唐鹏, 李越, 张小乐, 吴荣昌, 王光旭, 魏鑫. 2019. 中国志留纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 93–114

山克强, 吕勇, 潘明. 2013. 云南保山熊洞村志留系栗柴坝组笔石新材料. 地层学杂志, 37: 609

山显任, 赵文金, 林翔鸿, 陈阳, 李强, 朱敏, 盖志琨. 2022. 中国志留纪兰多维列世特列奇早期下红层对比之古鱼类化石证据. 地层学杂志, 46: 138–153

四川省地质局第三区域地质测量队三分队. 1977. 1/20万得荣幅(H-47-28)区域地质调查报告. 四川省地质局

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. 1982. 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

四川省区域地层表编写组. 1978. 西南地区区域地层表, 四川省分册. 北京: 地质出版社. 672

宋礼生. 1999. 西秦岭南带志留纪笔石生物地层. 甘肃地质学报, 8: 28–46

谭雪春, 董致中, 秦德厚. 1982. 滇西保山地区下泥盆统兼论志留、泥盆系的分界. 地层学杂志, 6: 199–208

唐鹏, 蔡习尧, 梁艳. 2012. 塔里木柯坪地区晚奥陶-早志留世的几丁虫. 全国微体古生物学分会第九届会员代表大会暨第十四次学术年会, 全国化石藻类专业委员会第七届会员代表大会暨第十五次学术讨论会. 41–42

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

王宝瑜. 1983. 昆仑山-阿尔金山地区床板珊瑚新资料及其地层意义. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(2), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 170–186

王宝瑜. 1988. 新疆天山志留纪生物群及古地理特征. 新疆地质, 6: 40–51

王宝瑜. 1998. 中国北部及邻区志留纪床板珊瑚、日射珊瑚古生物地理特征. 新疆地质, 16: 144–157

王宝瑜, 张梓歆, 戎嘉余, 王成源, 蔡土赐. 2001. 新疆南天山志留纪-早泥盆世地层与动物群. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 130

王成源. 1980. 云南曲靖上志留统牙形刺. 古生物学报, 19: 369–378

王成源. 1981. 云南曲靖玉龙寺组时代的新认识. 地层学杂志, 5: 196, 240

王成源. 2001. 云南曲靖地区关底组的时代. 地层学杂志, 25: 125–127

王成源. 2013. 中国志留纪牙形刺. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 230

王成源, 曲永贵, 张树岐, 郑春子, 王永胜. 2004. 西藏申扎地区晚奥陶世-志留纪牙形刺. 微体古生物学报, 21: 237–250

王成源, 王平, 杨光华, 谢伟. 2009. 四川盐边稗子田志留系牙形刺生物地层的再研究. 地层学杂志, 33: 302–317

王鸿祯. 1978. 论中国地层分区. 地层学杂志, 2: 81–104

王鸿祯, 何心一. 1983. 中国志留纪四射珊瑚组合与生物地理分区. 见: 古生物学基础理论丛书编委会, 主编. 中国古生物地理区系. 北京: 科学出版社. 32–42

王鸿祯, 王训练, 陈建强. 1989. 四射珊瑚的组合、演化阶段与生物古地理. 见: 王鸿祯, 何心一, 陈建强等, 主编. 中国古生代珊瑚分类演化及生物古地理. 北京: 科学出版社. 175–225

王俊卿, 王念忠, 朱敏. 1996. 塔里木盆地西北缘中、古生代脊椎动物化石及相关地层. 见: 童晓光, 梁狄刚, 贾承造, 主编. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社. 8–16

王立全, 潘桂棠, 丁俊, 姚东生. 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书. 北京: 地质出版社. 288

王念忠, 董致中. 1989. 中国志留纪鱼类微体化石的首次报道. 古生物学报, 28: 192–206

王念忠, 王俊卿, 张国瑞, 王世涛. 1998. 西秦岭若尔盖、迭部志留纪和早泥盆世棘鱼类的首次报道——西秦岭志留纪和泥盆纪脊椎动物研究之一. 古脊椎动物学报, 36: 268–281

王朴. 1992. 塔里木西南缘坎地力克地区发现奥陶-志留纪笔石化石. 新疆地质, 10: 286

王朴, 胡继宗, 宋杉林, 杨笑春. 1988. 新疆柯坪地区*Sinacanthus*的发现及其地层意义. 新疆地质, 6: 47–50

王世炎, 姚建新, 肖序常, 计文化. 2003. 新疆塔什库尔干县达布达尔志留纪笔石动物群的新发现. 地质通报, 22: 839–840

王伟, 赵平. 2009. 大理海东志留系-泥盆系牙形类动物群研究新知. 云南地质, 28: 345–350

王瑶琳, 徐胜林, 侯明才, 陈安清, 石坻石, 张聪, 覃英伦. 2022. 云南保山地区下仁和桥组页岩特征、有机质富集因素及富集模型. 大庆石油地质与开发, 41: 37–46

王义刚. 1974. 奥陶系和志留系. 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, 地质. 北京: 科学出版社. 24–47

王怿. 2010. 中国奥陶纪晚期-志留纪早期孢型植物及古地理意义. 古

生物学报, 49: 1–9
王怿, 徐洪河. 2009. 中国志留纪陆生植物研究综述. 古生物学报, 48: 453–464
王怿, 戎嘉余, 詹仁斌, 黄冰, 吴荣昌, 栾晓聪. 2014. 四川南部布拖地区志留系的新研究. 地层学杂志, 38: 257–267
王怿, 戎嘉余, 唐鹏, 王光旭, 张小乐. 2016. 四川盐边稗子田剖面志留系新认识. 地层学杂志, 40: 225–233
王怿, 戎嘉余, 唐鹏, 黄冰, 张小乐, 赵文金. 2021. 中国志留纪岩石地层划分和对比. 地层学杂志, 45: 271–285
王泽九, 王小烈, 黄枝高, 姚建新. 2018. 中国地层表(2014)说明书. 北京: 地质出版社. 488
文世宣, 章炳高, 王义刚, 孙东立, 董得源, 尹集祥, 吴浩若, 陈楚震, 王玉净, 何国雄, 穆西南, 耿国仓, 廖卫华, 陈挺恩, 郭师曾. 1984. 西藏地层. 北京: 科学出版社. 405
吴望始. 1975. 珠穆朗玛峰地区的珊瑚化石. 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(第一分册). 北京: 科学出版社. 83–128
吴望始, 廖卫华, 赵嘉明. 1982. 西藏古生代四射珊瑚. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队, 主编. 西藏古生物(第四分册). 北京: 科学出版社. 107–151
吴长江, 陈双玲, 张禄权, 谢忱. 2019. 西昌盆地奥陶系大箐组油气成藏地质条件评价. 天然气勘探与开发, 42: 8–14
伍鸿基. 1977. 西南地区志留-泥盆纪三叶虫的新属种及其地层意义. 古生物学报, 16: 97–121
伍鸿基. 1987. 西秦岭碌曲-迭部地区晚志留世三叶虫. 见: 地质矿产部西安地质矿产研究所, 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 西秦岭碌曲、迭部地区晚志留世与泥盆纪地层古生物(下册). 南京: 南京大学出版社. 243–256
西藏地质局综合普查大队. 1980. 西藏申扎地区古生代地层的新发现. 地质论评, 26: 151, 162
西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 707
夏代祥, 刘世坤. 1997. 西藏自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 302
项礼文. 1984. 三叶虫. 见: 林宝玉等, 主编. 中国地层, 6, 中国的志留系. 北京: 地质出版社. 207–209
新疆维吾尔自治区区域地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表, 新疆维吾尔自治区分册. 北京: 地质出版社. 496
邢裕盛. 1985. 新疆柯坪发现奥陶纪及志留纪微体古植物、几丁虫和虫牙化石. 中国地质科学院地质研究所所刊, 13: 162
邢裕盛, 方晓思. 1999. 新疆柯坪奥陶-志留纪微古植物群及其地层意义. 地层古生物论文集, 27: 125–135
徐宪, 魏振声, 陈国恩, 焦生瑞. 1982. 青藏高原区域地层简表. 北京: 地质出版社. 163
许汉奎, 倪寓南, 陈挺恩. 1981. 藏北申扎地区的志留-泥盆系. 地层学杂志, 5: 316–320
阎春波, 张保民, 杨博. 2019. 滇西保山熊洞村栗柴坝组牙形石的发现及其地质意义. 地质通报, 38: 922–929
杨曾荣. 1985. 西藏南部地区的志留系. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(16), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 35–49
杨恒书, 何心一, 段丽兰. 1990. 西秦岭若尔盖-迭部地区志留系研究的新进展. 现代地质, 4: 13–26
姚建新, 肖序常, 高联达, 计文化, 尹宗义, 韩芳林, 纪占胜, 武桂春. 2005. 西昆仑叶城南部麻扎地区志留纪几丁虫动物群新发现. 地质通报, 24: 95–97
姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新. 2017. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 32: 924–931
姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 王伟财, 高晶, 安宝晟. 2019. “亚洲水塔”变化与影响. 中国科学院院刊, 34: 1203–1209
姚檀栋, 徐祥德, 欧阳志云, 傅伯杰, 施鹏, 陈发虎, 丁林, 吴福元, 崔鹏, 葛全胜, 安宝晟, 王伟财. 2021. 第二次青藏科考服务青藏高原生态文明高地建设. 中国科学院院刊, 36(Z2): 17–28
叶少华, 金淳泰, 何原相, 万正权. 1983. 滇东北大关地区的志留纪地层. 中国地质科学院成都地质矿产研究所所刊, 4: 119–140
尹赞勋, 王尚文. 1948. 甘肃玉门县“南山系”中志留纪笔石之发现. 地质论评, 13: 264
俞昌民. 1962. 北祁连山中志留世珊瑚化石. 见: 中国科学院地质古生物研究所, 主编. 祁连山地质志, 第四卷, 第三分册. 北京: 科学出版社. 13–110
喻洪津. 1985. 藏北申扎地区中-晚志留世牙形石生物地层. 见: 李廷栋, 刘增乾, 袁学诚, 李光岑, 主编. 青藏高原地质文集(16), 地层古生物. 北京: 地质出版社. 15–31
袁桃. 2017. 西藏申扎地区奥陶纪-志留纪碳同位素异常及古海洋环境研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1–197
云南省地质局第一区域地质测量大队. 1973. 1/20万大理幅(G-47-23)区域地质调查报告. 云南省地质局
云南省地质局区域地质调查队. 1980. 1/20万保山幅(G-47-28)区域地质调查报告. 云南省地质局
张娣, 余谦, 陆俊泽, 王正和, 赵安坤, 刘伟, 何江林, 雷子慧. 2020. 云南永善-大关地区五峰组-龙马溪组黑色页岩生物地层划分与沉积环境探讨: 以新地2井为例. 地球科学, 45: 739–751
张娣, 刘伟, 周业鑫, 牟必鑫, 周志, 郝景宇, 赵安坤, 陆俊泽, 余谦. 2022. 扬子区西南缘奥陶纪末-志留纪初笔石生物地层对比及意义. 沉积与特提斯地质, 42: 413–425
张俊鹏, 李超, 张元动. 2022. 早古生代海洋缺氧事件的地质记录与背景机制. 科学通报, 67: 1644–1659
张师本, 王成源. 1995. 从牙形刺动物群论依木干他乌组的时代. 地层学杂志, 19: 133–135
张师本, 高琴琴, 耿良玉, 王俊卿, 陈钦保, 蔡习尧, 刘劼, 梁西文. 2001. 志留系. 见: 周志毅, 主编. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科

学出版社. 81–102
张树岐, 曲永贵, 郑春子. 2003. 西藏北部申扎地区志留纪岩石地层和生物地层. 地质通报, 22: 964–969
张文堂, 范嘉松. 1960. 祁连山奥陶纪及志留纪三叶虫. 见: 中国科学院地质古生物研究所, 主编. 祁连山地质志, 第四卷, 第一分册. 北京: 科学出版社. 83–148
张予杰, 张以春, 王冬兵, 苟正彬. 2021. 青藏高原中南部前寒武系及古生界岩石地层组成和时代特征. 地质通报, 40: 1814–1835
张元动, Lenz A C. 1999. 云南墨江志留纪地层及其笔石序列. 地层学杂志, 23: 161–169
张远志. 1996. 云南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社. 366
章炳高, 何国雄. 1984. 喀喇昆仑分区. 见: 文世宣, 章炳高, 王义刚, 孙东立, 董得源, 尹集祥, 吴浩若, 陈楚震, 王玉净, 何国雄, 穆西南, 耿国仓, 廖卫华, 陈挺恩, 郭师曾, 主编. 西藏地层. 北京: 科学出版社. 190–201
赵文金. 2005. 中国古生代中期盔甲鱼类及其古地理意义. 古地理学报, 7: 305–320
赵文金, 朱敏. 2014. 中国志留纪鱼化石及含鱼地层对比研究综述. 地学前缘, 21: 185–202
赵文金, 王士涛, 王俊卿, 朱敏. 2009. 新疆柯坪-巴楚地区志留纪含鱼化石地层序列与加里东运动. 地层学杂志, 33: 225–240
赵文金, 张晓林, 贾国东, 沈延安, 朱敏. 2021. 滇东志留系-泥盆系界线与肺鱼-四足动物分歧点的最小时间约束. 中国科学: 地球科学, 51: 1773–1787
赵秀丽, 张锡麒, 代东峰. 2006. 新疆南天山中志留世生物群及其意义. 山东科技大学学报(自然科学版), 25: 53–56
赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2001. 青藏高原地层. 北京: 科学出版社. 542
郑春子. 2005. 西藏北部永珠地区奥陶纪-志留纪地层研究. 地层学杂志, 29: 16–21
中国科学院地质研究所, 中国科学院地质古生物研究所, 中国科学院兰州地质研究室, 北京地质学院. 1963. 祁连山地质志, 第二卷, 第一分册. 北京: 科学出版社. 256
邹才能, 赵群, 从连铸, 王红岩, 施振生, 武瑾, 潘松圻. 2021. 中国页岩气开发进展、潜力及前景. 天然气工业, 41: 1–14
Allan J R, Matthews R K. 1977. Carbon and oxygen isotopes as diagenetic and stratigraphic tools: Surface and subsurface data, Barbados, West Indies. Geology, 5: 16
Aye Ko Aung , Cocks L R M. 2017. Chapter 14—Cambrian-Devonian stratigraphy of the Shan Plateau, Myanmar (Burma). Memoirs, 48: 317–342
Aye Ko Aung. 2012. The Paleozoic stratigraphy of Shan Plateau, Myanmar—An updated version. J Myanmar Geosci Soc, 5: 1–73
Bassett M G. 1985. Towards a “common language” in stratigraphy. Episodes, 8: 87–92
Bhargava O N. 2008. Palaeozoic successions of the Indian Plate. Mem Geol Soc India, 74: 209–244
Blieck A, Goujet D, Janvier P, Lelièvre H. 1984. Microrestes de vertébrés du Siluro-Dévonien d’Algérie, de Turquie et de Thaïlande. Geobios, 17: 851–859
Bond D P G, Grasby S E. 2017. On the causes of mass extinctions. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 478: 3–29
Boucot A J, Gauri K L. 1968. Age and relationship of basal Muth Quartzite of Kashmir, India. Geol Soc Am Spec Pap, 121: 33
Bowman C N, Young S A, Kaljo D, Eriksson M E, Them Ii T R, Hints O, Martma T, Owens J D. 2019. Linking the progressive expansion of reducing conditions to a stepwise mass extinction event in the late Silurian oceans. Geology, 47: 968–972
Brown J C. 1913. Contributions to the geology of the Province of Yunnan in Western China, III, Notes on the stratigraphy of the Ordovician and Silurian beds of Western Yunnan. Rec Geol Surv India, 43: 327–334
Bunopas S. 1981. Paleogeographic History of Western Thailand and Adjacent Parts of Southeast Asia—A Plate Tectonics Interpretation. Doctoral Dissertation. Wellington: Victoria University of Wellington
Bunopas S. 1983. Palaeozoic succession in Thailand. In: Nutalaya P, ed. Proceedings of the Workshop on Stratigraphic Correlation of Thailand and Malaysia, Haad Yai, Volume 1, Technical Papers. Geological Society of Thailand, Bangkok. 39–76
Calner M. 2005. A Late Silurian extinction event and anachronistic period. Geology, 33: 305
Calner M. 2008. Silurian global events-at the tipping point of climate change. In: Ashraf M T, ed. Mass Extinction. Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag. 21–57
Chen Z Y, Guo W, Fang X, Li W J, Song J J, Qie W K, Zhang Y C. 2022. Silurian conodonts from the Nyalam region, southern Xizang (Tibet), China, and their biostratigraphical and palaeobiogeographical implications. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 588: 110838
Chen Z Y, Männik P, Fan J X. 2017. Llandovery (Silurian) conodont provincialism: An update based on quantitative analysis. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 485: 661–672
Chen Z Y, Männik P, Wang C Y, Fang X, Chen T E, Ma X, Zhang Y D. 2020. Silurian conodont biostratigraphy of the Laojianshan section, Baoshan, Yunnan Province, SW China. Geol J, 55: 6427–6441
Colchen M. 1971. Les formations Paléozoïques de la Thakkhola. In: Bordet P, Colchen M, Krummenacher D, Le Fort P, Mouterde R, Rémi M, eds. Recherches Géologiques dans l’Himalaya du Népal, Région de la Thakkhola. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique. 85–118
Dhital M R. 2015. Geology of the Nepal Himalaya: Regional Perspective of the Classic Collided Orogen. Cham, Switzerland:

Springer International Publishing. 498
Dong Y P, Sun S S, Santosh M, Zhao J, Sun J P, He D F, Shi X H, Hui B, Cheng C, Zhang G W. 2021. Central China Orogenic Belt and amalgamation of East Asian continents. Gondwana Res, 100: 131–194
Gagnier P Y, Jahnke H, Shi Y. 1989. A fish fauna of the Lower Yulongsi Formation (Upper Silurian) of Qujing (E. Yunnan, SW China) and its depositional environment. Cour. Forschungsinst. Senckenberg, 110: 123–135
Geng L Y, Qian Z S, Ding L S, Wang Y, Wang G X, Cai X Y. 1997. Silurian chitinozoans from the Yangtze Region. Palaeoworld, 8: 1–152
Hagen D, Kemper E. 1976. Geology of the Thong Pha Phum area (Kanchanaburi province, western Thailand). Geol Jahrb, B21: 53–91
Hao S G, Xue J Z, Liu Z F, Wang D M. 2007. *Zosterophyllum* Penhallow around the Silurian-Devonian Boundary of Northeastern Yunnan, China. Int J Plant Sci, 168: 477–489
Hla Thein. 1991. Lower Silurian graptolites from Pyin Oo Lwin area. Georeports, 1:11–22
Hnin Hnin Swe, Maw Maw Myint. 2019. Stratigraphy of the rock units exposed in Taungkyun area, Pyin Oo Lwin Township, Mandalay Region. Taunggyi Univ Res J, 11: 345–351
Holland C H, Bassett M G. 1989. A Global Standard for the Silurian System, Geological Series 9. Cardiff: National Museum of Wales. 325
Holland C H. 1985. Series and stages of the Silurian System. Episodes, 8: 101–103
Jeppsson L, Talent J A, Mawson R, Andrew A, Corradini C, Simpson A J, Wigforss-Lange J, Schönlaub H P. 2012. Late Ludfordian correlations and the Lau Event. In: Talent J A, ed. Earth and Life: Global Biodiversity, Extinction Intervals and Biogeographic Perturbations Through Time. Dordrecht: Springer. 653–675
Jeppsson L. 2005. Conodont-based revisions of the Late Ludfordian on Gotland, Sweden. GFF, 127: 273–282
Kobayashi T, Sakagami S. 1989. A Silurian trilobite from Thailand. Proc Jpn Acad, Ser B, 65: 31–33
La Touche T H D. 1913. Geology of the Northern Shan States. Mem Geol Surv India, 39: 1–379
Lenz A, Kozłowska-Dawidziuk A. 2004. Ludlow and Pridoli (Upper Silurian) Graptolites from the Arctic Islands, Canada. Ottawa: NRC Research Press. 141
Liao W H. 1981. A preliminary study of the rugose corals from the Wase Group of Dali, western Yunnan. Geol Soc Am Spec Pap, 187: 65–76
Liu F, Wang Y, Zhu H C, Ouyang S. 2016. Palynomorphs from massive metamorphosed rocks in Lvchun, Yunnan, Southwest China: Evidence for the Ludlow age and its geological implications. Rev Palaeobot Palynol, 233: 146–160
Liu G C, Sun Z B, Zi J W, Santosh M, Zhao T Y, Feng Q L, Chen G Y, Nie X M, Li J, Zhang S T. 2021. Proto-Tethys ophiolitic mélange in SW Yunnan: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. Geosci Front, 12: 101200
Liu J B, Wang Y, Zhang X L, Rong J Y, Jin J. 2016. Early Telychian (Silurian) marine siliciclastic red beds in the Eastern Yangtze Platform, South China: Distribution pattern and controlling factors. Can J Earth Sci, 53: 712–718
Loydell D K, Kyi Pyar Aung K P. 2017. The “Panghkawkwo graptolite bed” (Llandovery, Silurian), Myanmar and the location of the Sibumasu (or Sibuma) Terrane in the Silurian. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 469: 1–17
Loydell D K. 2012. Graptolite biozone correlation charts. Geol Mag, 149: 124–132
Männik P. 1998. Evolution and taxonomy of the Silurian conodont *Pterospathodus*. Palaeontology, 41: 1001–1050
Mattern F, Schneider W. 2000. Suturing of the Proto- and Paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China). J Asian Earth Sci, 18: 637–650
Maung Maung, Aye Ko Aung. 2009. The first record of the late Silurian conodonts of the Linwe Formation, Ye-ngan Township, southern Shan State. J Myanmar Geosci Soc, 2: 1
McLaughlin P I, Emsbo P, Brett C E. 2012. Beyond black shales: The sedimentary and stable isotope records of oceanic anoxic events in a dominantly oxic basin (Silurian Appalachian Basin, USA). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 367-368: 153–177
Melchin M J, Sadler P M, Cramer B D. 2020. The Silurian Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. Geologic Time Scale 2020, Volume 2. Amsterdam: Elsevier. 695–732
Metcalfe I. 2021. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia. Gondwana Res, 100: 87–130
Mu E Z, Ni Y N. 1983. Uppermost Ordovician and lowermost Silurian graptolites from the Xainza area of Xizang (Tibet) with discussion on the Ordovician-Silurian boundary. Palaeontol Cathayana, 1: 155–181
Mu E Z, Ni Y N. 1985. Researches on the graptolites of Xizang (Tibet). Palaeontol Cathayana, 2: 1–18
Mu E Z. 1963. Research in graptolite faunas of Chilianshan. Sci Sin, 12: 347–370
Myint Lwin Thein M L. 1973. The Lower Paleozoic stratigraphy of western part of the Southern Shan State, Burma. Geol Soc Malay Bull, 6: 143–163
Nguyen V P. 1998. Lower Devonian graptolites from Muong Xen area (northwest part of Central Viet Nam). J Geol (Hanoi) Ser B, 11–12:

29–40

Nguyen V P. 2002. Ordovician–Silurian and Lower Devonian graptolite bearing beds from Vietnam. VNU J Sci Nat Sci Technol, 18: 38–50

Pascoe E H. 1959. A Manual of the Geology of India and Burma, Volume II. 3rd ed. Calcutta: Government of India Press. 1338

Reed F R C. 1906. The Lower Paleozoic fossils of the Northern Shan States, Upper Burma. Mem Geol Surv India, Palaeontol Ind, New Ser, 2: 1–154

Reed F R C. 1912. Ordovician and Silurian fossils from the Central Himalayas. Mem Geol Surv India, Palaeontol Ind, Ser 15, 7: 1–168

Reed F R C. 1917. Ordovician and Silurian fossils from Yun-nan. Mem Geol Surv India, Palaeontol Ind, New Ser, 6: 1–85

Ridd M F. 2011. Lower Palaeozoic. In: Ridd M F, Barber A J, Crow M J, eds. The Geology of Thailand. London: Geological Society. 33–52

Rong J Y, Boucot A J, Su Y Z, Strusz D L. 1995. Biogeographical analysis of Late Silurian brachiopod faunas, chiefly from Asia and Australia. Lethaia, 28: 39–60

Rong J Y, Chen X, Su Y Z, Ni Y N, Zhan R B, Chen T E, Fu L P, Li R Y, Fan J X. 2003. Silurian paleogeography of China. In: Landing E, Johnson M E, eds. Silurian Lands and Seas: Paleogeography Outside of Laurentia. New York State Museum Bull, 493: 243–298

Rong J Y, Huang B, Zhan R B, Fu L P. 2017. Silurian brachiopod genera on type species of China. In: Rong J Y, Jin Y G, Shen S Z, Zhan R B, ed. Phanerozoic Brachiopod Genera of China. Beijing: Science Press. 245–341

Sakagami S, Nakornsri N. 1987. On some Silurian corals from Northeast Thailand.. Proc Jpn Acad Ser B, 63: 242–245

Scholle P A, Arthur M A. 1980. Carbon isotope fluctuations in Cretaceous pelagic limestones: Potential stratigraphic and petroleum exploration tool. AAPG Bull, 64: 67–87

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

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

Sepkoski J J. 1984. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. III. Post-Paleozoic families and mass extinctions. Paleobiology, 10: 246–267

Sinha H N, Prasad B, Srivastava S S. 1998. Ordovician-Silurian acritarch biostratigraphy of the Tethyan Garhwal Himalaya, India. Rev Palaeobot Palynol, 103: 167–199

Sinha H N, Srivastava S S, Prasad B. 1996. Record of prolific and indubitable acritarchs from the Lower Paleozoic strata of the Tethyan Garhwal Himalaya and age implication. Curr Sci, 71: 24–31

Sinha H N. 2008. Silurian acanthomorphitae acritarch from the Shiala Formation, Tethys Garhwal Himalaya, India. Himalayan J Sci, 5: 150–151

Sinha H N. 2022. Characterization of Ordovician-Silurian acritarchs from the Kumaon Tethys Himalaya, Pithoragarh district, Uttarakhand, India. J Geol Soc India, 98: 113–124

Song J J, Guo W, Huang J Y, Zhang Y C, Chen Z Y, Sun Y C, Ma J, Qie W K. 2022. Silurian ostracods from the Nyalam region, southern Tibet, China and their implications on palaeoenvironment and palaeobiogeography. J Palaeogeogr, 11: 85–96

Sun Y C, Szetu H T. 1947. Stratigraphy and structure of Baoshan, Western Yunnan. Proc Geol Dep Peking Univ, 32: 1–15

Suttner T J, Ernst A. 2007. Upper Ordovician bryozoans of the Pin Formation (Spiti Valley, northern India). Palaeontology, 50: 1485–1518

Suttner T J, Kröger B. 2006. Late Ordovician to Early Silurian Gondwanan cephalopods of the Pin Formation (Spiti, northern India). N Jb Geol Paläont Mh, 2006: 595–612

Suttner T J, Lehnert O, Joachimski M, Buggisch W. 2007. Recognition of the Boda event in the Pin Formation of northern India based on new δ^{13}C and conodont data. Acta Palaeontol Sin, 46(Suppl): 466–470

Suttner T J. 2007. The Upper Ordovician to Lower Silurian Pin Formation (Farka Muth, Pin Valley, north India)—A formal discussion and redefinition of its controversial type-section. Acta Palaeontol Sin, 46(Suppl.): 460–465

Talent J A, Mawson R, Andrew A S, Hamilton P J, Whitford D J. 1993. Middle Palaeozoic extinction events: Faunal and isotopic data. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 104: 139–152

Tian J J, Zhu H C, Huang M, Liu F. 2011. Late Silurian to Early Devonian palynomorphs from Qujing, Yunnan, southwest China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 85: 559–568

Tong D T, Boucot A J, Rong J Y, Fang Z J. 2001. Late Silurian marine shelly fauna of Central and Northern Vietnam. Geobios, 34: 315–338

Tong D T, Ta H P, Janvier P, Nguyen H H, Cúc N T T, Nguyen T D. 2013. Silurian and Devonian in Vietnam—Stratigraphy and facies. J Geodyn, 69: 165–185

Tong D T, Vu K. 2006. Stratigraphic Units of Viet Nam. Hanoi: Hanoi National University Publishing House. 526

Tong D T, Vu K. 2011. Stratigraphic Units of Viet Nam. 2nd ed. Hanoi: Vietnam National University Publisher. 553

Torsvik T H, Cocks L R M. 2017. Earth History and Palaeogeography.

Cambridge: Cambridge University Press. 317
Uyeno T T, Barnes C R. 1983. Conodonts of the Jupiter and Chicotie formations (Lower Silurian), Anticosti Island, Québec. Geol Sur Can Bull, 355: 1–49
Walliser O H, Wang C Y. 1989. Upper Silurian stratigraphy and conodonts from the Qujing District, East Yunnan, China. Cour. Forschungsinst. Senckenberg, 110: 111–121
Wang C Y, Aldridge R J. 2010. Silurian conodonts from the Yangtze Platform, South China. Spec Pap Palaeontol, 83: 1–136
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 H Z, Ho X Y. 1981. Silurian rugose coral assemblages and paleobiogeography of China. Geol Soc Am Spec Pap, 187: 55–64
Wang K, Liu B C, Wang Y, Xu H H. 2023. A palynoflora of southern Xinjiang, China, and the proximity of the Tarim Plate to western Gondwana during the Llandovery (Silurian). J Asian Earth Sci, 255: 105769
Wang W H, Muir L A, Chen X, Tang P. 2015. Earliest Silurian graptolites from Kalpin, western Tarim, Xinjiang, China. Bull Geosci, 90: 519–542
Wang Y, Zhang Y D. 2010. Llandovery sporomorphs and graptolites from the Manbo Formation, the Mojiang County, Yunnan, China. Proc R Soc B, 277: 267–275
Yan G Z, Lehnert O, Männik P, Calner M, Luan X C, Gong F Y, Li L X, Wei X, Wang G X, Zhan R B, Wu R C. 2022. The record of early Silurian climate changes from South China and Baltica based on integrated conodont biostratigraphy and isotope chemostratigraphy. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 606: 111245
Yan G Z, Wu R C. 2021. Silurian (Late Llandovery-Wenlock) conodont fauna and biostratigraphy from the Yanbian area of Sichuan Province, south-west China. Papers Palaeontology, 7: 1793–1824
Yang C. 1948. The Silurian Waseh Formation of western Yunnan and its *Favosites* faunas. Natn Peking Univ Ann Pap, Geol Ser, 50: 129–140
Yao J X, Xiao X C, Gao L D, Han F L, Cui J T, Peng H L, Ji Z S, Wu G C. 2006. Silurian acritarchs and chitinozoans in Wenquangou Group from the West Kunlun region. Acta Palaeontol Sin, 45: 528–532
Yin T H, Lu C H. 1937. On the Ordovician and Silurian beds of Shihtien, Western Yunnan. Bull Geol Soc China, 16: 41–56
Zhang S, Barnes C R. 2004. Conodont bio-events, cladistics and response to glacio-eustasy, Ordovician-Silurian boundary through Llandovery, Anticosti Basin, Québec. Geol Soc Lond Spec Publ, 230: 73–104
Zhang X L, Wang Y, Rong J Y, Li R Y. 2014. Pigmentation of the Early Silurian shallow marine red beds in South China as exemplified by the Rongxi Formation of Xiushan, southeastern Chongqing, central China. Palaeoworld, 23: 240–251
Zhang Y D, Fan J X, Wang Y, Song Y Y, Cheng J F. 2013. A mid Telychian (Llandovery) graptolite fauna from Mojiang, Yunnan Province, southwestern China. Mem Assoc Australas Palaeontol, 44: 123–142
Zhang Y D, Lenz A C. 1997. Uppermost Wenlock and Ludlow graptolites from southern Yunnan, China. Can J Earth Sci, 34: 1220–1238
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
Zhao W J, Herten U, Zhu M, Mann U, Lücke A. 2010. Carbon isotope stratigraphy across the Silurian-Devonian transition in Zoige (West Qinling), China. Boll Soc Paleontol Ital, 49: 35–45
Zhao W J, Wang N Z, Zhu M, Jia L T. 2012. The microvertebrate remains and assemblage sequences across the Silurian/Devonian transition in West Qinling, China. Vert PalAs, 50: 309–321
Zhao W J, Wang N Z, Zhu M, Mann U, Herten U, Lücke A. 2011. Geochemical stratigraphy and microvertebrate assemblage sequences across the Silurian/Devonian transition in South China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 85: 340–353
Zhao W J, Zhu M. 2010. Siluro-Devonian vertebrate biostratigraphy and biogeography of China. Palaeoworld, 19: 4–26
Zhao W J, Zhu M. 2015. A review of Silurian fishes from Yunnan, China and related biostratigraphy. Palaeoworld, 24: 243–250
Zhen Y Y, Zhang Y D, Wang Z H, Percival I G. 2016. Huaiyuan Epeirogeny—Shaping Ordovician stratigraphy and sedimentation on the North China Platform. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 448: 363–370
Zhu M, Zhao W J, Jia L T, Lu J, Qiao T, Qu Q M. 2009. The oldest articulated osteichthyan reveals mosaic gnathostome characters. Nature, 458: 469–474

(责任编委: 王向东)