中国科学: 地球科学 2017 年 第 47 卷 第 6 期: 720 ~ 732
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式

陈旭[1*], 樊隽轩[2], 王文卉[3], 王红岩[4], 聂海宽[5], 石学文[6], 文治东[7], 陈冬阳[2,8], 李文杰[1,8]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 中国科学院资源地层学与古地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 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;
3. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
4. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 廊坊 065007;
5. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;
6. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 成都 610041;
7. 中国石油化工股份有限公司勘探南方分公司研究院, 成都 610041;
8. 中国科学院大学, 北京 100049

* E-mail: xuchen@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2016-09-25; 接受日期: 2017-03-15; 网络版发表日期: 2017-04-26
中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDB10010100)和国家自然科学基金项目(批准号: U1562213和41272042)资助

摘要 龙马溪组黑色页岩在贵州、重庆等地广泛分布, 是志留系生物地层研究和页岩气勘探的重要对象. 本文针对黔渝地区从贵阳、遵义、桐梓、綦江至华蓥山这一由南向北的廊带, 以其中生物地层研究程度较高的典型剖面为基础, 总结出龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. 在横向上利用笔石带对比框架, 将遵义至华蓥山划分为四个发育不同黑色页岩层段的廊带, 并研究它们随时间展布的规律; 同时, 也较为准确地获得了龙马溪组黑色页岩与其上混合相地层和碳酸盐岩地层之间互相消长的相变过程. 此外, 本文还利用笔石深度分带的通用模式, 论述了黔渝龙马溪组连续沉积的笔石页岩层段随时间其沉积水深不断加深的过程, 从而将其划分为从LM1到LM5的海侵渐进阶段和LM5之后的均衡扩展阶段, 在每一阶段龙马溪组黑色页岩的分布受控于不同的主导因素. 这一阶段性渐进展布模式, 对研究四川盆地南缘龙马溪组黑色页岩的时空分布具有重要的参考意义.

关键词 龙马溪组, 黑色页岩, 笔石带, 笔石深度分带, 海侵渐进阶段, 均衡扩展阶段

1 引言

龙马页岩是中国最早建立的岩石地层单元之一(Lee和Chao, 1924; Hsieh和Chao, 1925), 代表中国扬子区志留系下部的黑色含笔石页岩等地层, 龙马溪组一名即由此沿袭而来. 由于其层位重要、分布广泛、富含笔石, 易与国内外相应地层对比, 因此近百年来一直是地层学和古生物学研究的热点之一. 龙马溪组在

中文引用格式: 陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 王红岩, 聂海宽, 石学文, 文治东, 陈冬阳, 李文杰. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. 中国科学: 地球科学, 47: 720–732, doi: 10.1360/N072016-00186
英文引用格式: Chen X, Fan J X, Wang W H, Wang H Y, Nie H K, Shi X W, Wen Z D, Chen D Y, Li W J. 2017. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China. Science China Earth Sciences, 60: 1133–1146, doi: 10.1007/s11430-016-9031-9

© 2017 《中国科学》杂志社

中、上扬子区主要包括两部分, 即下部的黑色笔石页岩和上部风化后为灰色、黄色、黄绿色页岩、粉砂岩, 其中上部仅含有少量的笔石. 龙马溪组下部黑色页岩中的笔石最早由孙云铸(Sun, 1933)所描述. 本文所涉及黔渝交界地区的龙马溪组笔石也曾由陈旭和林尧坤(1978)和金淳泰等(1982)所描述. 此外, 20世纪50年代出版的《中国标准化石》和70~80年代出版的《区域古生物图册》中, 也包含了不少龙马溪组笔石的图像和简要描述. 涉及龙马溪组地层学方面的研究论文更多, 其中以穆恩之和陈旭(1962)、林宝玉(1984)和戎嘉余等(Rong等, 2003)的三次对中国志留系的总结为代表.

在过去的几年时间里, 中国南方的页岩气勘探与开发, 在四川、重庆等地的龙马溪组黑色页岩中获得了一系列重要突破, 进而推动并掀起了对龙马溪组黑色页岩研究的新高潮. 最近, 戴金星[1)]明确指出"四川盆地是中国页岩气勘探开发的重点地区, 已发现了筇竹寺组和龙马溪组两套主力海相页岩气层", 并明确"目前勘探开发工作主要集中在埋层浅、产量高的龙马溪组". 在产业部门的实施方向中也把龙马溪组页岩气的开发放在重要位置(王志刚, 2015). 龙马溪组黑色页岩的井下分层和对比, 之前主要基于岩性或测井曲线等, 如龙一段、龙二段等, 但其分辨率和精度远低于笔石带(邹才能等, 2015), 因此最近两年, 笔者等多次应邀对中国石油天然气集团公司和中国石油化工集团公司等的一些钻井岩芯中的龙马溪组和五峰组开展基于笔石带的地层划分和对比研究, 并对重点露头区的相关地层进行了现场考察. 在此基础上, 笔者等对扬子区龙马溪组下部的黑色笔石页岩的空间分布规律进行了初步总结, 识别出几种不同的展布模式, 本文论及的就是其中之一.

为了便于产业部门的页岩气勘探和开发, 笔者等近期建立了扬子区五峰组(WF)、龙马溪组(LM)和南江组(N)的笔石带划分方案(陈旭等, 2015)(图1), 并冠以代码编号. 穆恩之先生(Mu, 1984)曾对五峰组和龙马溪组的笔石带做过编码, 但笔者等当前使用的笔石带划分已有改动, 因此编码符号也与穆恩之的存在差异. 目前此图已被中国石油天然气集团公司和中国石油化工集团公司的勘探开发研究院, 以及分公司、油田等所采用, 并作为井下和露头区五峰组、龙马溪组地层划分和对比的标准, 因此本文在论及五峰组、龙马溪组笔石带时, 将使用这些笔石带和它们的代码, 以便在更大的范围内沟通和使用.

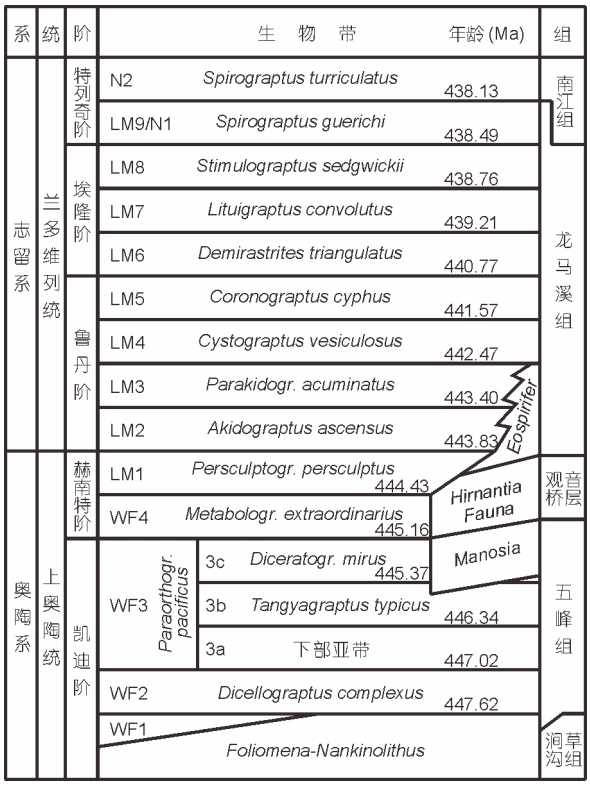


图 1　扬子区五峰组(WF)、龙马溪组(LM)和南江组(N)的笔石带划分

WF1系*Dicellograptus complanatus*带, 其他各笔石带的全名均已标注在图中; 各带底界的同位素年龄值引自Gradstein等(2012). 笔石带划分引自陈旭等(2015)

2　黔渝地区龙马溪组关键剖面分析

本文选择沿贵阳-遵义-桐梓-綦江-华蓥山一线近南北向展布的一系列关键剖面, 以说明从黔中古陆向北至华蓥山的上扬子海盆龙马溪组黑色笔石页岩的空间展布规律(图2). 这一南北向的廊带, 正好穿越了重庆涪陵的龙马溪组页岩气高产地带, 因此具有重要的科学意义和应用价值.

1) 戴金星. 2015. 中国页岩气发展战略对策建议. 中国科学院地学部咨询报告

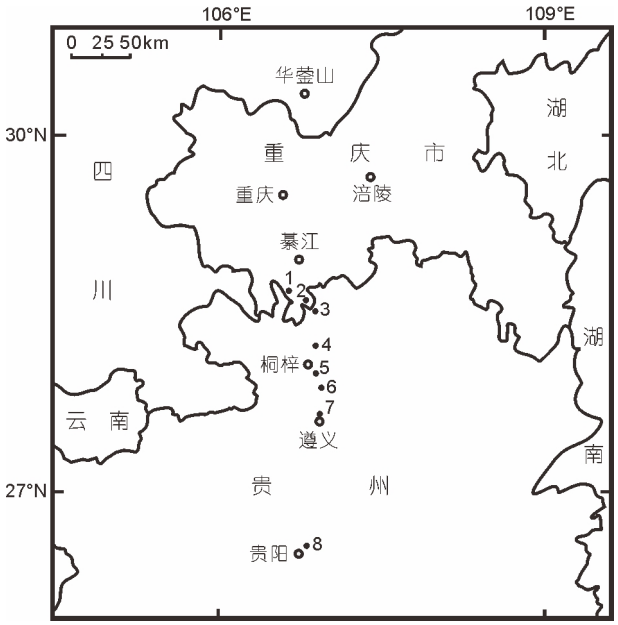


图 2　贵州、重庆和四川的龙马溪组关键剖面位置图

1, 綦江丁山; 2, 綦江观音桥; 3, 桐梓韩家店; 4, 桐梓凉风垭; 5, 桐梓红花园、戴家沟; 6, 遵义板桥; 7, 遵义董公寺家当湾; 8, 贵阳乌当黄花冲、野狗冲2号剖面

2.1　贵阳乌当剖面和黔中古陆的暴露

贵阳市区东部约13km的乌当出露了很好的奥陶系地层. 戎嘉余等曾研究过乌当黄花冲剖面和乌当野狗冲的两个剖面(戎嘉余等, 1996; Rong和Johnson, 1996). 根据他们的研究结果, 并与现今华南奥陶系的划分方案对比, 我们可以较明确地判别出黔中古陆的核心地区露出水面的时间. 其中乌当野狗冲2号剖面, 据戎嘉余等的研究, 奥陶-志留系间的剥蚀面在湄潭组*Undulograptus austrodentatus*层之上, 相当于中奥陶统达瑞威尔阶中下部*Undulograptus austrodentatus*笔石带与*Acrograptus ellesae*笔石带之间, 代表了黔中古陆最早露出水面的时间. 戎嘉余等将野狗冲1号剖面的剥蚀面对比到该地牯牛潭组与十字铺组之间, 将黄花冲剖面的剥蚀面对比到临湘组的顶部, 大致相当于现今华南奥陶系凯迪阶*Dicellograptus elegans*笔石带(相当于*Dicellograptus johnstrupi*带)的顶界. 戎嘉余等的研究为我们解决了黔中古陆核心地带隆升暴露过程的时间问题, 这对于认识黔渝地区龙马溪组黑色页岩的展布模式是至关重要的, 因为黔中古陆核心部位的暴露过程, 虽然始于达瑞威尔中晚期, 至凯迪期*Dicellograptus elegans*带结束, 但黔中古陆边缘的隆升和暴露并未就此结束, 黔中古陆的北缘直至志留纪鲁丹期末才彻底暴露, 从而完成了黔中古陆整体隆升的全过程, 其间还牵涉到黔中古陆北缘在志留纪初的一次进退, 关系到与之相关地带龙马溪组底部黑色页岩展布过程中的阶段性.

2.2　遵义董公寺-板桥剖面及黔中古陆的北缘

遵义市距贵阳市143km, 董公寺则位于遵义市北郊, 距遵义市中心7km. 张文堂等(1964)在董公寺家当湾发现了志留系“龙马溪组”, 为一套6m厚的灰黄色、灰黑色砂质页岩及细砂岩, 其下为观音桥层, 其上与下二叠统地层假整合接触. 本文将这6m的地层暂称为“龙马溪组”, 主要是因为这段地层有别于典型的龙马溪组的黑色笔石页岩, 而是一套以细砂岩为主的地层, 代表了一种近岸相的碎屑岩相地层. 家当湾的“龙马溪组”地层中, 距底0.28m处产笔石*Coronograptus cyphus*(Lapworth)(=*Pristiograptus* cf. *gregarius* Lapworth)(张文堂等, 1964), 近顶部发现笔石*Coronograptus* cf. *gregarius*(Lapworth)及*Korenograptus* sp.(=*Glyptograptus* cf. *tamariscus* Nicholson)(张文堂等, 1964)等, 因此应属于*Coronograptus cyphus*带(LM5). 戎嘉余等(2011)在该“龙马溪组”之下又识别出志留系的壳相地层——五里坡层, 此五里坡层与之下的观音桥层之间仍存在一个沉积间断, 两者之间为假整合接触.

家当湾的“龙马溪组”中夹含的笔石虽少, 但却十分重要, 指示了黔中古陆的北缘在LM5时期位于遵义董公寺一带. 戎嘉余等(2011)认为遵义至桐梓, 在观音桥层与上覆的“龙马溪组”之间存在地层间断, 缺失LM1上部到LM4下部的地层, 这表明黔中古陆曾一度向北扩展到桐梓地区, 但在志留纪鲁丹晚期(LM5), 海水再度淹没了遵义、桐梓之间地带, 但这一海侵事件仅持续了约一个百万年的时间, 在LM5之后, 董公寺地区再度上升成陆, 成为黔中古陆的北缘.

1998年4月底, 笔者与戎嘉余等再去董公寺工作, 家当湾一带已建满房屋, 但在102地质队子弟小学操场边, 又发现了“龙马溪组”, 其厚度和岩性与家当湾相似, 为5.6m厚的土黄色砂质页岩和细砂岩, 其中仅采获了*Korenograptus*和*Metaclimacograptus*两属的少量保存不佳的标本, 其底部还发现了6cm厚的风化壳(粘土层), 因此遵义董公寺的“龙马溪组”代表了非黑色页岩的近岸碎屑岩相. 2008年, 南京地质古生物研究

所黄冰等在董公寺以北20km处的遵义板桥镇工作, 发现该地的“龙马溪组”与董公寺类似, 也是一套近岸的灰色至棕黄色粉砂岩. 他们在“龙马溪组”底部采集的笔石标本, 经本文作者(陈旭)鉴定, 为*Normalograptus rectangularis*(M'Coy), 此种笔石在扬子区见于龙马溪组中上部的LM3至LM5. 由此看来, 遵义董公寺的“龙马溪组”可以向北扩展到板桥, 虽然这些地方的“龙马溪组”均非典型的黑色笔石页岩, 也不具备烃源岩的潜力, 但是却代表了黔中古陆北缘的近岸碎屑岩相带, 因此具有重要的古地理意义. 从另一方面来看, 这样一个特殊的岩相带, 又可依靠笔石来确定时代, 应该建立一个新的地层单元, 但是目前在家当湾附近找不到合适的命名剖面, 我们期望今后可在遵义董公寺-板桥一带找到合适的替代剖面.

2.3 桐梓红花园、戴家沟、凉风垭剖面

位于桐梓县城东南7km处的红花园, 是奥陶系红花园组的命名地, 历年来被多次详细研究过(盛莘夫, 1958; 张文堂等, 1964; Chen等, 2000), 是中国奥陶-志留系的经典剖面之一. 红花园村东侧山顶的山王庙剖面也是观音桥层的重要剖面, 虽然这里的观音桥层与其上的龙马溪组之间存在着一个沉积间断(Chen等, 2000; 戎嘉余等, 2010), 但其上龙马溪组底部却是典型的黑色页岩, 其中含有丰富的笔石动物群, 因此可以说真正的龙马溪组黑色笔石页岩, 始于遵义板桥与桐梓红花园之间. Chen等(2000)在张文堂等(1964)的基础上, 重新测制了红花园山王庙的龙马溪组剖面, 但在Chen等(2000)文中只发表了龙马溪组底部的8层笔石. 此后, 作者之一(樊隽轩)又补充测完了山王庙剖面的龙马溪组露头, 共厚12.84m. 其底部的黑色笔石页岩中含少量白云母和粉砂质成分, 说明当时仍有来自黔中古陆的细粒碎屑物沉降在这一地区, 并沉积在黑色页岩之中. 黑色页岩向上渐变为灰黑色砂质页岩, 但其中仍含丰富的笔石动物群. 山王庙的龙马溪组笔石带的划分自上而下如下:

*Demirastrites triangulatus*带下部(LM6下部)

*Coronograptus cyphus*带(LM5)

*Cystograptus vesiculosus*带(LM4)

---假整合---

观音桥层

在山王庙龙马溪组底部*C. vesiculosus*(Nicholson)首次出现之前, 还有一层厚仅0.4m的黑色页岩, 其中仅产正常笔石科的分子, 有可能代表了更老的层位, 但由于缺少特征分子(定带分子), 本文暂将此层归入LM4之中. 在山王庙剖面距顶5.35m处, 首次出现了*Demirastrites triangulatus*(Harkness), 因此山王庙剖面的笔石最高层位可能只到LM6的下部.

笔者之一(陈旭)在2006年鉴定了詹仁斌等在红花园附近的戴家沟剖面采集的笔石标本. 戴家沟位于桐梓县城以南10km. 剖面和笔石鉴定名单由詹仁斌和靳吉锁(Zhan和Jin, 2007)发表. 戴家沟的龙马溪组厚80m, 但遗憾的是笔石动物群的分异度和丰度均较低. 在底部17.5m的黑色页岩中发现了LM4的带化石和特征分子, 其上转变为风化后为灰色、黄灰色泥岩; 在62.5~77m的层位中发现*Rastrites guizhouensis* Chen and Lin, 该种在桐梓韩家店剖面被作为*Coronograptus gregarius*带(相当于LM6)的下部亚带的典型分子(陈旭和林尧坤, 1978), 其层位与红花园山王庙剖面的龙马溪组*Demirastrites triangulatus*带下部(LM6下部)相当.

桐梓县城以北13km处的凉风垭垭口, 也出露了龙马溪组典型的黑色页岩, 其层位相当于该组底部LM2-LM3的层位, 之下可能还包含了相当于LM1的地层. 其上的黑色笔石页岩层位, 因为地形特殊、出露有限而未能采集, 但是凉风垭出露的龙马溪组黑色页岩中不但不含砂质, 而且夹含硅质页岩, 与扬子盆地中心部位的五峰组和龙马溪组的黑色笔石页岩相似, 这应该是相对远岸、较深水的岩性标志.

2.4 桐梓韩家店

桐梓韩家店距桐梓县城35km, 其南5km处为松坎镇. 韩家店村夹于高山之间, 村小而史远. 村边沿老川黔公路一侧自上而下出露韩家店组、石牛栏组和龙马溪组, 是研究扬子区志留系的经典剖面之一, 也是韩家店组的命名地(Ting, 1947).

韩家店的龙马溪组厚209.1m, 但真正的黑色笔石页岩仅是其下部的168.7m地层, 之上的40.4m地层为灰黑色钙质页岩, 含腕足动物和少量三叶虫和珊瑚化石(张文堂等, 1964), 称为松坎段(葛治洲等, 1979), 相当于金淳泰等(1982)在綦江观音桥剖面建立的桥沟组的下部. 韩家店剖面龙马溪组下部黑色页岩中的笔石带由陈旭和林尧坤(1978)建立, 其底部产双列攀合笔石, 以“*Glyptograptus persculptus - sinuatus* transient”为代表,

难以准确对比到带, 但龙马溪组与观音桥层之间是连续沉积的. 韩家店龙马溪组最高的笔石带厚达90.7m, 被称为"*Oktavites communis*带"(陈旭和林尧坤, 1978). 该种现已归入*Campograptus*属, 但是这段地层中始终未发现LM7的带化石*Lituigraptus convolutus*(Hisinger). 在扬子区其他剖面, *Campograptus communis*(Lapworth)是*Demirastrites triangulatus*带(LM6)的常见分子, 因此韩家店的龙马溪组最高笔石层位可能只达到LM6的顶部, 但已略高于桐梓红花园龙马溪组顶部层位.

2.5 重庆綦江观音桥-丁山镇

綦江观音桥剖面为观音桥层的命名剖面, 距桐梓韩家店不到10km, 是同一个背斜(酒店垭背斜)的两翼. 金淳泰等(1982)详细测制并研究了这一剖面. 綦江观音桥的龙马溪组共厚160.8m, 其底部与韩家店剖面类似, 与观音桥层整合接触. 其顶部据金淳泰等(1982)研究应为*Stimulograptus sedgwickii*带(LM8). 笔者等仔细比对了他们发表的该种标本的图像, 认为其不但与*Stimulograptus sedgwickii*(Portlock)的模式标本相去甚远, 而且与笔者等在湖北神农架发现的*S. sedgwickii*(Portlock)标本也存在显著差异. 在金淳泰等(1982)的*S. sedgwickii*带之下也未见*Lituigraptus convolutus*带的带化石, 而是发育了大量*Campograptus communis*(Lapworth)等笔石, 因此綦江观音桥的龙马溪组顶部也应相当于*Demirastrites triangulatus*带(LM6)的顶部, 与桐梓韩家店的情况一致. 但是观音桥剖面中相当于韩家店龙马溪组上部40.4m灰黑色钙质页岩的部分, 在岩性上却存在明显差异, 因此金淳泰等(1982)将之命名为一个新的地层单元——桥沟组. 桥沟组为钙质岩和泥质灰岩的互层, 含有大量的壳相化石并夹含少量的笔石. 其中虽然没有采获LM7的带化石*Lituigraptus convolutus*(Hisinger), 但桥沟组的笔石动物群组成已与其下LM6的面貌不同, 笔者等认为桥沟组可能已达到LM7或更高的层位, 其顶界比松坎段高.

位于观音桥附近的丁山镇一带, 龙马溪组顶界已明显上移, 据笔者等2014年冬对来自该地的钻井岩芯的研究, 其龙马溪组顶部产出*Stimulograptus* cf. *sedgwickii*(Portlock)等笔石, 已达到LM8的层位. 由此可见龙马溪组黑色页岩的顶部层位, 从观音桥至丁山镇已上移至LM8的下部, 但观音桥的桥沟组看来只有相当局限的地理分布.

2.6 重庆涪陵-四川华蓥山

涪陵地区介于重庆綦江与四川华蓥山之间, 也是中国龙马溪组和五峰组黑色页岩中页岩气开发较早突破的地区之一. 郭彤楼和刘若冰(2013)发表了JY1井龙马溪组综合柱状图, 王志刚(2015)最近又将该井归纳为具备生烃、储集和保存条件的"三元富集"井. 笔者等于2014年参与研究了涪陵地区龙马溪组和五峰组的钻井岩芯样品, 并参考了周边露头剖面的地层发育情况, 在涪陵地区建立了较为完整的笔石生物地层框架, 从而可以实现准确的区域地层划分和对比(陈旭等, 2015). 涪陵地区龙马溪组黑色页岩的底部与之下的观音桥层为连续沉积, 龙马溪组顶界达到*Stimulograptus sedgwickii*带(LM8), 与綦江丁山镇的生物地层序列一致. 从王志刚(2015)文中的地理分布图来看, 涪陵焦石坝附近的4口井自东北向西南方向排列, 应可顺势延续到綦江丁山镇, 因此具有较大的分布面积; 此外, 涪陵条带的龙马溪组黑色页岩发育了从LM1到LM8的完整序列, 且全部被新的地层所覆盖, 因此成为了页岩气产出的重要地区.

近年来, 笔者等对四川华蓥山三百梯(或称阎王沟或红岩煤矿)的五峰组和龙马溪组黑色页岩进行了考察. 该地区发育了五峰组、观音桥层和龙马溪组的连续黑色笔石页岩沉积, 但地层的总厚度不大, 约在50m左右. 在这一地区中, 龙马溪组的底部(LM1)与观音桥层为连续沉积, 龙马溪组的顶部可达到LM9带, 高于綦江丁山镇和涪陵地区(LM8). 从涪陵至华蓥山, 不但松坎段或桥沟组消失, 就是石牛栏组也已相变为小河坝组. 据金淳泰[2)]的报道, 小河坝组在华蓥山厚达385.7m. 其层位显然已至*Spirograptus guerichi*带(LM9)或更高. 小河坝组之上发育了白云庵组含珊瑚等壳相动物群的碳酸盐岩地层. 华蓥山代表了黔渝地区龙马溪组黑色页岩顶界最高的地点.

兹将上述关键剖面龙马溪组的地层划分与对比整理如图3所示.

2) 金淳泰. 1982. 西南地区地层总结——志留系. 地质部成都地质矿产研究所. 135

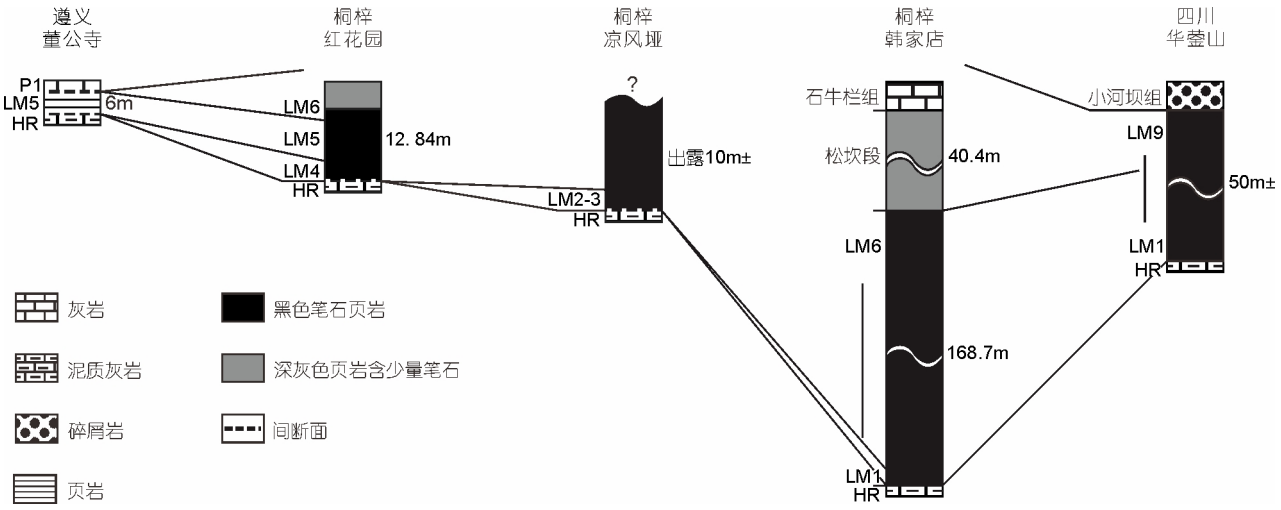


图 3　遵义董公寺至四川华蓥山龙马溪组地层对比图

HR, 观音桥层; P1, 下二叠统. 图中岩性柱未按实际厚度值等比例绘制

3　黔渝龙马溪组的对比及其黑色页岩的阶段性渐进展布过程

尹赞勋(1949)首次总结中国志留系时, 将黔北的志留系三分, 自下而上分别为龙马溪组、石牛栏组和韩家店组. 穆恩之和陈旭(1962)和张文堂等(1964)基本沿用了这一划分方案, 并将这三个地层单元分别对应于志留系的下、中、上三统. 汪啸风(1965)在贵州石阡高于“韩家店组”(相当于此后由葛治洲等建立的秀山组)的地层中, 发现了志留纪兰多维列世特列奇期的笔石, 由于兰多维列世是志留纪的第一个世, 因此他的发现首次动摇了传统的中国扬子区志留系下、中、上三统的三分方案. 此后, 葛治洲等(1977, 1979)提出黔北龙马溪组、石牛栏组和韩家店组的大部分均属于“下志留统”, 相当于国际标准的兰多维列统. 戎嘉余等(1996)又将桐梓韩家店的龙马溪组顶界对比至*Lituigraptus convolutus*带(LM7)上部, 将石牛栏组顶界对比至*Spirograptus turriculatus*带下部, 把韩家店组顶界对比至*Monograptus crispus*带下部. 本文根据近年来的研究进展, 将黔渝遵义至华蓥山一线的龙马溪组及其上覆地层, 全部下拉至志留系特列奇阶底部及以下的层位, 并列表对比如下(图4).

志留纪初黔中古陆曾一度向北扩展至桐梓县城附近, 因此桐梓红花园、戴家沟一带缺失LM1-LM3的地层. 此后海盆扩展, 在LM5时期一度淹没遵义董公寺-板桥一带, 形成近20km的近岸碎屑岩相带. 由于黔中古陆核心部分早在中奥陶世就逐渐出露并遭受剥蚀, 至LM5时期可能已“准平原化”, 因此遵义董公寺-板桥的近岸带碎屑岩中缺少粗碎屑的沉积, 并有少量的正常笔石科(Normalograptidae)的双列攀合笔石以及个别单笔石科(Monograptidae)的分子扩散至此. 在遵义董公寺-板桥的近岸带沉积的并不是真正的龙马溪组, 更无黑色页岩可言. 此近岸的“龙马溪组”, 代表黔渝龙马溪组自黔中古陆向外海展布的第1个廊带, 宽约26km.

桐梓红花园、戴家沟出露了真正的龙马溪组黑色笔石页岩, 但只发育了LM4至LM6下部的笔石序列. 从地表露头来看, 龙马溪组底部地层风化后仍是黑色的页岩、泥岩和硅质页岩, 有的地区夹含硅质层. 向上, 页岩风化后为黄灰色、灰绿色等, 不含硅质而含砂质, 但在井下的新鲜岩芯中一般都是深灰色且富含笔石, 因此我们仍将之归入龙马溪组黑色笔石页岩的范畴. 桐梓红花园、戴家沟这一带的龙马溪组厚约80m, 其分布的范围从遵义板桥以北至桐梓凉风垭以南, 宽约53km, 这是黔渝龙马溪组分布的第2个廊带.

从桐梓凉风垭经韩家店至綦江观音桥, 龙马溪组黑色页岩包括了LM1至LM6的地层序列, 其底部笔石带齐全, 与观音桥层之间无地层缺失, 其顶界略高于桐梓红花园、戴家沟, 达到LM6带的顶部. 这一地带宽约45km, 龙马溪组厚度增至160m左右, 是黔渝龙马溪组自古陆向外海展布的第3个廊带.

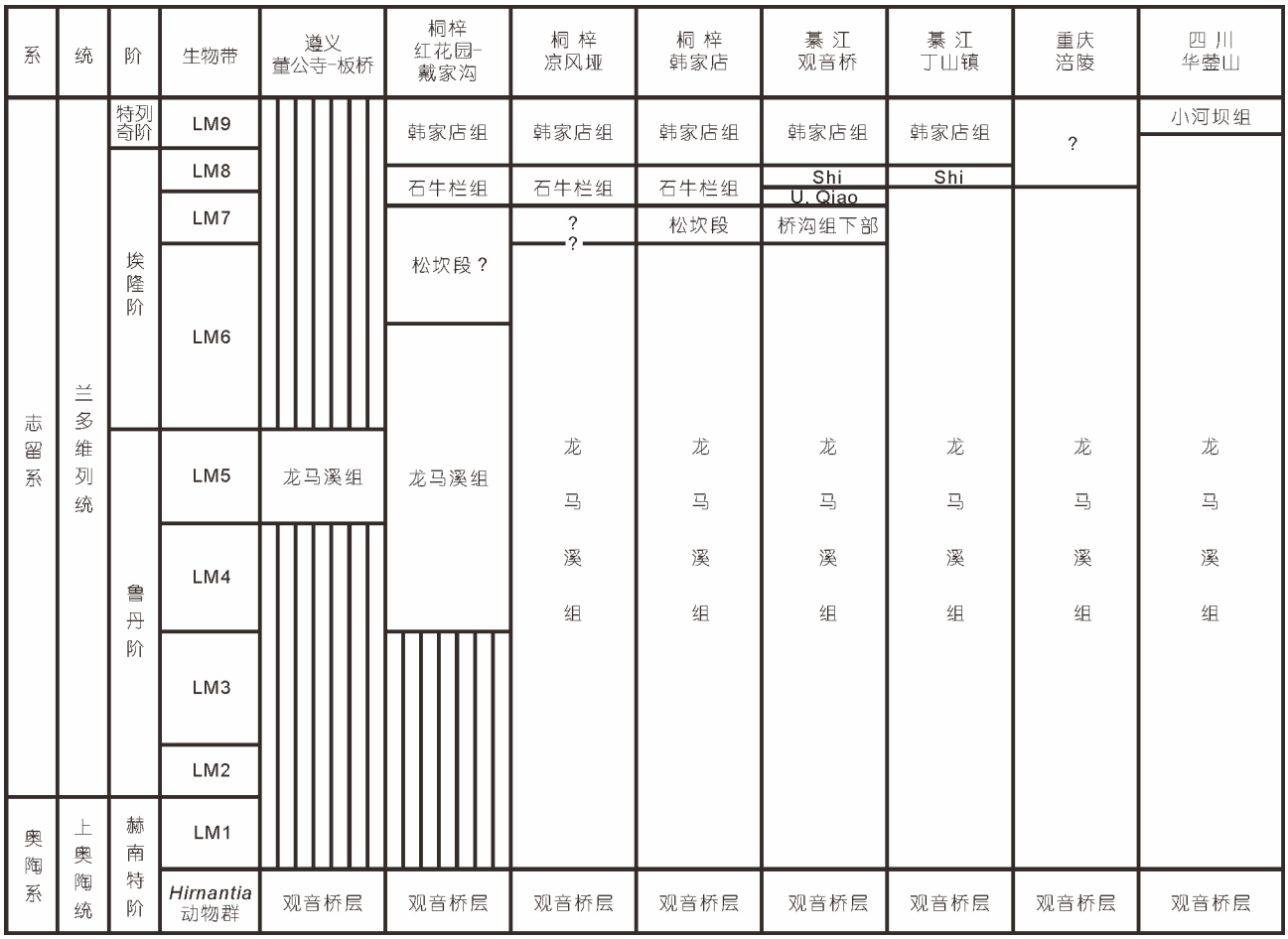


图 4　黔渝龙马溪组及相关地层的对比

Shi: 石牛栏组; U. Qiao: 桥沟组上部

从綦江丁山镇一带向北穿越重庆市的大部分范围直至四川华蓥山东侧是龙马溪组的覆盖区, 其间的龙马溪组黑色页岩发育更加完整, 但厚度并不大, 其顶界已达到*Spirograptus guerichi*带(LM9)底部. 从綦江至华蓥山约170km, 代表了黔渝龙马溪组展布的第4个廊带. 此带已进入了扬子盆地的中心部位, 在相对稳定的范围内分布着从LM1至LM8-9的富含有机质的黑色页岩, 是扬子区内对页岩气最有贡献的地带.

黔渝龙马溪组黑色页岩的分布从*Persculptograptus persculptus*带(LM1)开始. 陈旭等(2004)详细研究了华南的笔石动物群在奥陶纪末的演化历程, 提出了两幕式的灭绝过程, 其中在LM1带末发生的正是其中的第二幕, 是一次小灭绝事件. 在此期间, 伴随着第一幕灭绝事件之后南极冰盖的迅速消融, 全球范围的海平面上升导致了黑色页岩的广布, 笔石动物群也在LM1带之后迅速复苏. 黔渝龙马溪组黑色页岩正是随着全球海平面的上升, 自北而南向黔中古陆方向不断随海侵而展布.

如上所述, 奥陶-志留纪之交, 从LM1至LM3, 龙马溪组底部的黑色页岩随着全球海平面的上升, 从扬子海盆的中心(第4廊带)向黔中古陆方向扩展, 并到达桐梓凉风垭(第3廊带). 此时在桐梓红花园-戴家沟一线(属第2廊带), LM1至LM3的地层缺失, 表明该地带此时仍处于遭受剥蚀的黔中古陆的北缘. 理论上来说, 位于凉风垭与红花园/戴家沟之间的地带, 应该也发育黔中古陆边缘的碎屑岩相带, 可惜至今尚未在该地区找到合适的剖面露头. 从*Cystograptus vesiculosus*带(LM4)开始, 龙马溪组的黑色页岩从桐梓凉风垭进一步扩展到桐梓红花园-戴家沟一线, 而此时遵义董公寺-板桥一带仍处于海平面之上. 至*Coronograptus*

*cyphus*带(LM5), 随着海平面进一步上升, 海水才逐渐淹没董公寺-板桥地区(第1廊带), 导致该地区成为黔中古陆北缘的边缘碎屑岩相带. 而真正的龙马溪组黑色页岩从未扩及第1廊带, 它的南界最多达到红花园-戴家沟与遵义板桥之间. 从LM1到LM5带是黔渝地区龙马溪组的黑色页岩展布的第一个阶段, 这个阶段龙马溪组的黑色页岩随着全球海平面上升由北而南、由深而浅的渐进扩展, 到LM5时期扬子海在黔渝地区的南向扩展达到了最大值(图5A~C). 本文将这一阶段(LM1-LM5)称为龙马溪组黑色页岩的海浸渐进阶段.

此后, LM6(*Demirastrites triangulatus*带)的黑色笔石页岩由红花园-戴家沟(第2廊带)向北一直分布至华蓥山, 黑色页岩的顶界也由南向北逐渐抬升. 黑色页岩的顶界在第2廊带只达到LM6带的下部, 至第3廊带扩至丁山镇, 其顶界上升到LM6带上部至LM7带, 至重庆涪陵廊带则进一步上升至LM8带, 到四川华蓥山最终达到*Spirograptus guerichi*带(LM9)底部.

与此同时, 从第2廊带的红花园-戴家沟开始, LM6带近底部之上开始出现含陆源碎屑、非黑色页岩的地层. 虽然标准的松坎段剖面位于桐梓韩家店, 但是从桐梓红花园开始向北, 从LM6带开始就已出现来自黔中古陆的含陆源碎屑地层, 到綦江观音桥则变为桥沟组. 松坎段和桥沟组之上发育了碳酸盐相的石牛栏组, 王怿等(2013)还特别论述了石牛栏组为浅水碳酸盐岩的证据. 此外, 在桐梓-綦江一线的西侧如习水-南川, 还出现了浅水碎屑岩相的小河坝组. 小河坝组分布非常广泛, 可向西北方向覆盖了重庆乃至华蓥山地区, 但在华蓥山三百梯剖面上, 小河坝组迟至LM9才出现. 这种由南向北, 从LM6下部至LM9下部, 浅水碎屑岩相地层不断推迟出现的展布特征, 说明了黔中古陆在LM6之后仍在不断隆升, 这种隆升实质上是扬子上升(陈旭和戎嘉余, 1996), 也即整个扬子区最终在特列奇期整体上升事件的前奏.

综合来看, 黔渝地区龙马溪组黑色页岩的空间展布及其上浅水相地层的发育显示了两种控制因素共同作用的结果. 从LM1至LM5, 海水从第3廊带扩展至第1廊带(董公寺-板桥地区), 沉积了赫南特阶上部至鲁丹阶的黑色笔石页岩, 与此同时, 还在上扬子盆地的中心地区即第4廊带沉积了LM1-LM9的连续黑色笔石页岩, 反映的是志留纪兰多维列世全球海平面不断上升、海水加深的过程(Loydell, 1998). 虽然黔中地区从达瑞威尔中晚期至鲁丹末期发生了持续性的隆升事件, 但其影响范围仅限于该地区, 这一时期上扬子盆地的沉积主要由全球事件所控制. 从LM6开始, 在黔中古陆以北, 从上扬子盆地的南缘至其中心地区, 地区性的抬升作用开始占据主导地位, 整体上表现为地区性的海退以及浅水碎屑岩和浅水碳酸盐岩的逐渐出现, 即便在上扬子盆地的中心部位, 黑色页岩也在LM9之后彻底消失. 因此, 我们将LM6-LM9作为上扬子盆地龙马溪组黑色页岩的分布和演变过程的第二个阶段, 并称之为均衡扩展阶段(图5D).

最近, 何治亮等(2016)在分析四川盆地及其周缘龙马溪组底部黑色页岩沉积相时, 在南北两个方向上分别从黔中隆起和川中隆起到盆地中心部位的宜宾、石柱一线, 用等值线的方法、定量的说明了从浅水陆棚到深水陆盆的变化. 王玉满等(2016)也论述和图示了从黔中隆起区向北至长宁双河、隆昌, 以及从川中隆起区向南至长宁双河、隆昌这两个方向上, 五峰组-龙马溪组TOC含量>1%的页岩厚度等值线图, 准确地揭示了从古陆(隆起区)至盆地TOC含量随着黑色页岩厚度的增大而逐渐增加. 但这两个定量分布模式, 如果以笔石带为单位来进一步说明随时间推移的渐进规律就会更为准确, 因为龙马溪组黑色页岩在扬子区经历了约6Ma的历史, 期间必有变化. 因此, 本文阐明的黔渝龙马溪组黑色笔石页岩按笔石带的阶段性渐进展布模式, 对阐明同类型其他参数的定量变化均具有启发意义, 并可将之作为时间值以提高研究的精度, 赋予其地质历史演变进程上的意义.

4 黔渝龙马溪组笔石动物群的深度分带

Berry和Boucot(1972)在总结北美洲志留系时, 发现有的层位中一些特征的笔石组合和特征的腕足动物群落共存, 也就是说这些笔石死亡后沉落海底与特定的腕足动物组合埋藏在一起, 因此这些特定的腕足动物底栖组合(Benthic Assemblage, BA), 便可用来指示与之共同埋藏的笔石组合(Graptolite Assemblage, GA)生活时的海水深度(图6).

根据这些特征的笔石组合, 或根据全球这些特定的共同埋藏组合, 笔者等(Mu等, 1986; 陈旭等, 1990; Boucot和Chen, 2009)提出, 扬子区龙马溪组黑色页岩下部以双列攀合的笔石为主, 可称为正常笔石动物群

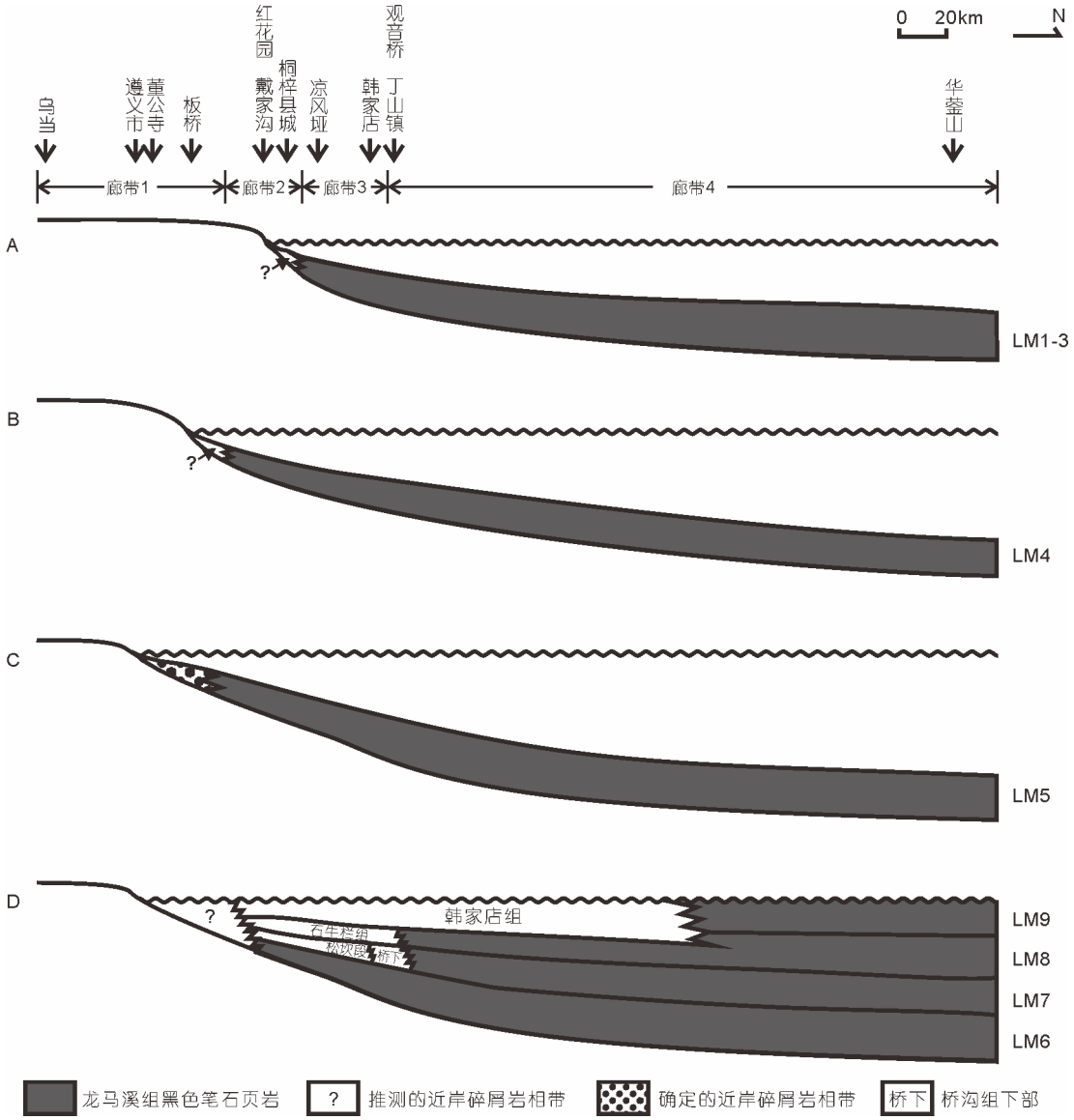


图 5　黔渝龙马溪组黑色页岩的分布模式

A~C为海侵渐进阶段, D为均衡扩展阶段

(N动物群), 其深度分布范围大致为几十米, 对应于GA3(相当BA3). 根据笔者目前的研究, 从LM1(*Persculptograptus persculptus* 带) 至 LM4(*Cystograptus vesiculosus*带), 主要的笔石属包括*Persculptograptus*、*Avitograptus*、*Neodiplograptus*、*Korenograptus*、*Normalograptus*、*Akidograptus*、*Parakidograptus*、*Metabolograptus*、*Paramplexograptus*、*Hirsutograptus*、*Paraclimacograptus*和 *Cystograptus*等双列攀合笔石, 无论从多样性或丰富度来看, 均大大超过单列笔石(如少量的*Atavograptus*和*Huttagraptus*等). 这些正常笔石动物群的分子生活在表层水中, 双列攀合的笔石体结构具有一定的强度, 可以适应表层水一定的水动力强度, 代表GA3的笔石组合, 其对应的水深大致为几十米, 和其下的*Hirnantia*动物群(BA2-3)代表的水深一致. 而向上至LM5(*Coronograptus cyphus*带)和LM6(*Demirastritus triangulatus*带), 笔石动物群的组合发生了重大变化, 上述的双列攀合笔石的多样性或丰富度大大降低; 相反, 单列笔石组合, 如*Monograptus*、

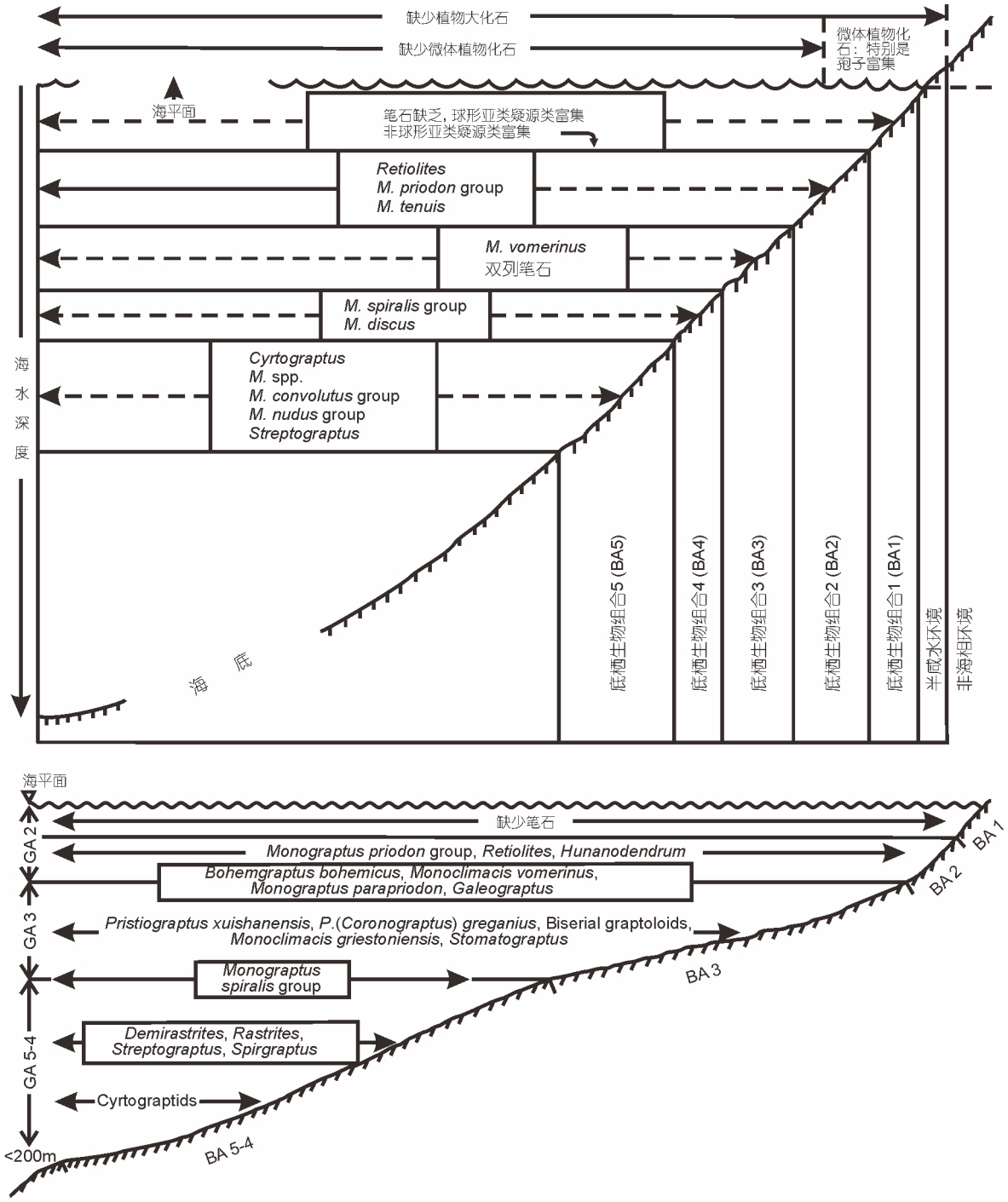


图 6　志留纪笔石的深度分带模式

据陈旭等(1990)、Boucot和Chen(2009)

Coronograptus、*Demirastrites*、*Rastrites*、*Campograptus*、*Lituigraptus*、*Torquigraptus*、*Pristiograptus*、*Stimulograptus*、*Spirograptus*和*Streptograptus*等, 可称为单笔石动物群(M动物群)(图7), 代替上述的正常笔石动物群而占据了主导地位, 加上还有一部分正常笔石动物群分子上延并与之共存, 使得LM5-LM6带中的

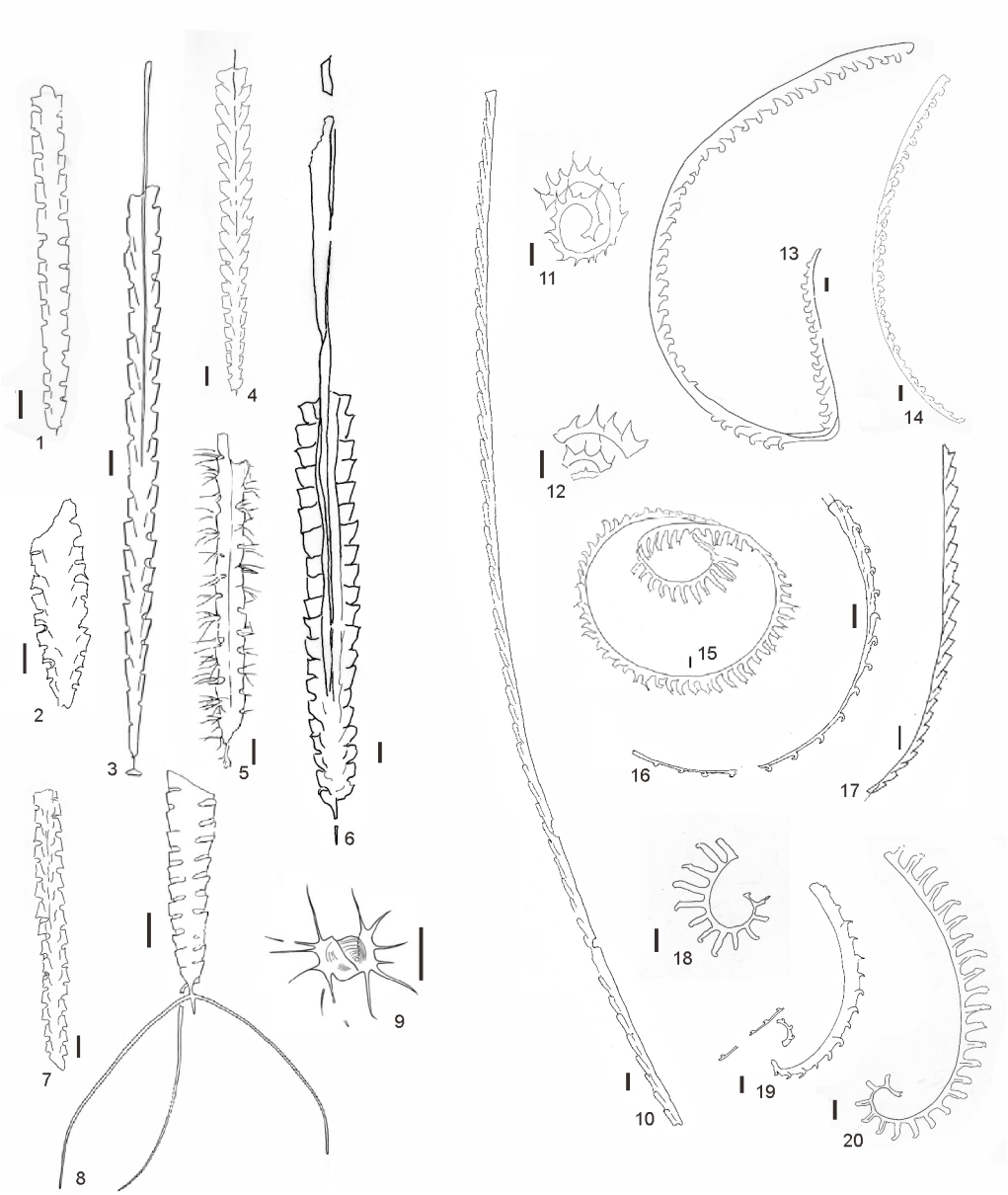


图 7　扬子区正常笔石动物群(N动物群)和单笔石动物群(M动物群)的代表性分子

正常笔石动物群: 1. *Normalograptus mirnyensis*(Obut and Sobolevskaya), 宜都, LM4; 2. *Paraclimacograptus obesus*(Churkin and Carter), 神农架, LM3-4; 3. *Akidograptus ascensus*(Davies), 毕节, LM2; 4. *Neodiplograptus elongatus*(Churkin and Carter), 鹤峰, LM5; 5, 9. *Hirsutograptus comantis*(Chaletzkaya), 宜昌, LM3; 6. *Cystograptus vesiculosus*(Nicholson), 神农架, LM4; 7. *Metaclimacograptus hubeiensis*(Mu et al.), 神农架, LM6-7; 8. *Normalograptus trifilis*(Manck), 武宁, LM2.单笔石动物群: 10. *Pribylograptus incommodus*(Tornquist), 神农架, LM4-6; 11, 12. *Spirograptus guerichi*(Loydell, Storch and Melchin), 神农架, LM9; 13. *Torquigraptus proteus* (Barrande), 神农架, LM9; 14. *Streptograptus plumosus*(Baily), 神农架, LM9; 15. *Lituigraptus convolutus*(Hisinger), 五峰, LM7; 16. *Monograptus arciformis*(Chen and Lin), 桐梓, LM6; 17. *Pristiograptus xiushanensis*(Mu), 务川, LM9; 18. *Rastrites approximatus*(Perner), 长宁, LM6; 19. *Campograptus chengkouensis*(Ge), 神农架, LM6-7; 20. *Demirastrites triangulatus*(Harkness), 长宁, LM6. 图中线条比例尺代表1mm

笔石组合十分复杂, 这些单笔石动物群的分子从表层水可下沉至较深层水, 代表了一个GA4-5的生态组合, 与之对应的水深应超过100m, 但不超过200m.

上述笔石深度分带模式, 是以腕足动物为主的底

栖生态群落共同埋藏的实例为依据的. 如果将之运用到笔石序列中去, 必须在连续稳定的黑色笔石页岩序列中才可体现其一般性规律. 例如, 龙马溪组黑色页岩中, LM1–LM4以正常笔石动物群为主导, LM5以后转而为单笔石动物群为主导, 特别是从LM6开始, 单笔石动物群的多样性进一步提高. 这种笔石组合特征的系列演变规律, 正符合水体逐渐加深的过程(Mu等, 1986). 因此, 笔石深度分带的通用模式是可以采用的. 但是, 绝不能简单地将其模式理解为某个笔石属种就一定生活某个特定的海水深度范围内, 而应当结合笔石组合面貌进行宏观的解析. 此外, 笔石深度分带模式的分析一定要与地区性的沉积环境演变相结合.

在遵义董公寺-板桥的陆缘碎屑岩相带, 尽管水体甚浅且富含泥沙质, 不适合多样性和丰度都高的笔石动物群生活, 但仍有少数单笔石动物群的分子(如*Coronograptus*)和正常笔石动物群的分子(如*Normalograptus*)扩散至此, 说明了很少量单笔石动物群的分子在表层水中就已存在, 它们可能是从原来生存于较深水的水层中上浮而来的. 在桐梓红花园-戴家沟, LM4以正常笔石动物群的分子为主, 水体较浅, 而且从LM4之后就已不是典型的黑色页岩, 水体进一步变浅; 至LM6底部虽有少数的单笔石动物群分子(*Rastrites*和*Demirastrites*等), 但并不能代表真正的单笔石动物群, 由此向上逐渐过渡到石牛栏组浅水碳酸盐岩. 但向北至桐梓韩家店-綦江观音桥, 典型的黑色笔石页岩可持续至LM6, 其中发育了典型的单笔石动物群, 多样性高, 其水体也明显加深. 向上才转变为混合相的松坎段或桥沟组, 水体变浅. 从綦江丁山镇至华蓥山的近盆地中心地带, 黑色笔石页岩最为连续和稳定, 发育了典型的单笔石动物群, 水体较深, 但从LM7-LM8也开始出现砂质沉积物, 最后演变为LM9上部巨厚的小河坝组较浅水碎屑岩, 较深水沉积环境从该地消失. 因此黔渝一线从桐梓韩家店到四川华蓥山, 龙马溪组从LM1到LM6总体上是一个海水逐渐加深的过程, 而这一过程与笔石的深度分带模式的演变是大体一致的, 我们据此可运用笔石的这一生态地层学方法, 配合沉积学等其他学科, 来解释龙马溪组黑色页岩从LM1至LM6的加深过程.

5 结论

黔渝龙马溪组黑色笔石页岩, 自南而北可以分为4个地理上的廊带. 志留纪之初随着全球海平面的上升, 从赫南特阶*Persculptograptus persculptus*带(LM1)至鲁丹阶*Coronograptus cyphus*带(LM5), 表现为龙马溪组底部黑色页岩自北而南推进的海浸渐进阶段, 使一度北扩的黔中古陆北缘向南收缩, 这是黔渝龙马溪组黑色笔石页岩扩展的第1阶段, 反映了全球性海平面上升事件主导控制的结果. 从埃隆阶*Demirastrites triangulatus*带(LM6)到特列奇阶底部的*Spirograptus guerichi*带(LM9), 从桐梓红花园-戴家沟向北, 笔石相的黑色页岩的顶部不断被混合相的细粒碎屑岩和碳酸盐岩所代替, 体现了黔中古陆持续上升、陆源碎屑供给不断加大的结果. 此为黔渝龙马溪组黑色笔石页岩扩展的第2阶段, 即均衡扩展阶段. 此时全球海平面持续上升的作用, 主要体现在上扬子盆地的中心地区沉积了LM1-LM9的连续黑色笔石页岩, 但这一全球控制因素不再占据主导地位. 从綦江丁山镇至华蓥山的第4个廊带, 无论从分布面积和黑色页岩总厚度来看, 都达到最大范围, 是页岩气产出最有利的地带.

运用笔石深度分带的通用模式, 结合龙马溪组黑色页岩纵向分布, 可以发现, 扬子区从LM1到LM6是海水不断加深、黑色页岩广布的过程. 这与同时期北非和中东主要油气田的热页岩(Hot shale; Lüning和Kolonic, 2003; Lüning等, 2005)的层段和油气产出潜力完全可以对比, 因此对龙马溪组黑色页岩的页岩气潜力的认识是具有全球意义的.

致谢 本文成文之际, 与本文作者(陈旭)共同研究桐梓韩家店笔石的林尧坤教授不幸与世长辞, 他对黔北龙马溪组研究做出过重要贡献, 笔者在此致以深切怀念. 本文系“Geobiodiversity Database”项目系列成果之一.

参考文献

陈旭, 樊隽轩, Melchin M J, Mitchell C E. 2004. 华南奥陶纪末笔石绝灭及幸存的进程和机制. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 编. 生物的大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 9–54, 1037–1038

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, 林尧坤. 1978. 黔北桐梓下志留统的笔石. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 12: 1–106

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, 徐均涛, 成汉钧, 汪明洲, 陈祥荣, 许安东, 邓占球, 伍鸿基, 丘金玉, 戎嘉余. 1990. 论汉南古陆及大巴山隆起. 地层学杂志, 14: 81–116
葛治洲, 戎嘉余, 杨学长, 刘耕武, 倪寓南, 董得源, 伍鸿基. 1977. 西南地区志留系十条剖面资料. 地层古生物, 8: 92–111
葛治洲, 戎嘉余, 杨学长, 刘耕武, 倪寓南, 董得源, 伍鸿基. 1979. 西南地区的志留系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 西南地区碳酸盐生物地层. 北京: 科学出版社. 155–220
郭彤楼, 刘若冰. 2013. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘JY1井为例. 天然气地球科学, 24: 643–651
何治亮, 聂海宽, 张钰莹. 2016. 四川盆地及其周缘奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析. 地学前缘, 23: 8–17
金淳泰, 叶少华, 何原相, 万正权, 王树碑, 赵裕亭, 李善姬, 徐星琪, 张正贵. 1982. 四川綦江观音桥志留纪地层及古生物. 成都: 四川人民出版社. 84
林宝玉. 1984. 中国地层(6), 中国的志留系. 北京: 地质出版社. 245
穆恩之, 陈旭. 1962. 中国各门类化石, 中国的笔石. 北京: 科学出版社. 171
戎嘉余, 陈旭, 王怿, 詹仁斌, 刘建波, 黄冰, 唐鹏, 吴荣昌, 王光旭. 2011. 奥陶-志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示. 中国科学: 地球科学, 41: 1407–1415
戎嘉余, 陈旭, 詹仁斌, 樊隽轩, 王怿, 张元动, 李越, 黄冰, 吴荣昌, 王光旭, 刘建波. 2010. 贵州桐梓县境南部奥陶系-志留系界线地层新认识. 地层学杂志, 34: 337–348
戎嘉余, Johnson M E, 赵元龙. 1996. 古喀斯特岩岸的地质意义——以黔中贵阳乌当志留纪岩岸为例. 地质论评, 42: 448–458
盛莘夫. 1958. 中国西南部奥陶纪三叶虫. 古生物学报, 6: 169–182
王怿, 戎嘉余, 唐鹏, 吴荣昌. 2013. 志留纪早期上扬子海域南部桐梓上升的新证据. 地层学杂志, 37: 129–138
王玉满, 王淑芳, 董大忠, 李新景, 黄金亮, 张晨晨, 管全中. 2016. 川南下志留统龙马溪组页岩岩相表征. 地学前缘, 23: 119–133
王志刚. 2015. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示. 石油与天然气地质, 36: 1–6
汪啸风. 1965. 黔北早志留世晚期和中志留世笔石群的发现及其意义. 古生物学报, 13: 118–132
尹赞勋. 1949. 中国南部志留纪地层之分类与对比. 中国地质学会志, 29: 1–61
张文堂, 许汉奎, 陈旭, 陈均远, 袁克兴, 林尧坤, 王俊庚. 1964. 贵州北部的奥陶系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 黔北地层现场会议——贵州北部的古生代地层. 33–78
邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 管全中, 张晨晨, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 杨智, 梁萍萍, 孙莎莎, 邱振. 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一). 石油勘探与开发, 42: 689–701
Berry W B N, Boucot A J. 1972. Correlation of the South American Silurian rocks. Geol Soc Amer Spec Paper, 133: 1–54
Boucot A J, Chen X. 2009. Fossil plankton depth zones. Palaeoworld, 18: 213–234
Chen X, Rong J Y, Mitchell C E, Harper D A T, Fan J X, Zhan R B, Zhang Y D, Li R Y, Wang Y. 2000. Late Ordovician to earliest Silurian graptolite and brachiopod biozonation from the Yangtze region, South China, with a global correlation. Geol Mag, 137: 623–650
Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M, Ogg G. 2012. The Geologic Time Scale 2012. Amsterdam: Elsevier. 1176
Hsieh C Y, Chao Y T. 1925. A study of the Silurian section at Lo Jo Ping, I Chang District, W. Hupeh. Bull Geol Soc China, 4: 39–44
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
Loydell D K. 1998. Early Silurian sea-level changes. Geol Mag, 135: 447–471
Lüning S, Kolonic S. 2003. Uranium spectral gamma-ray response as a proxy for organic richness in black shales: Applicability and limitations. J Pet Geol, 26: 153–174
Lüning S, Shahin Y M, Loydell D, Al-Rabi H T, Masri A, Tarawneh B, Kolonic S. 2005. Anatomy of a world-class source rock: Distribution and depositional model of Silurian organic-rich shales in Jordan and implications for hydrocarbon potential. AAPG Bull, 89: 1397–1427
Mu E Z. 1984. Research work on Ordovician-Silurian boundary in China. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, ed. Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China. Ordovician-Silurian Boundary (1). Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House. 13
Mu E Z, Boucot A J, Chen X, Rong J Y. 1986. Correlation of the Silurian rocks of China (A part of the Silurian correlation for East Asia). Geol Soc Amer Spec Paper, 202: 1−80
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: Johnson M E, Landings E, eds. Silurian Lands and Seas: Paleogeography outside of Laurentia. N Y State Mus Bull, 493: 243−298
Rong J Y, Johnson M E. 1996. A stepped karst unconformity as an Early Silurian rocky shoreline in Guizhou Province (South China). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 121: 115–129
Sun Y C. 1933. Ordovician and Silurian Graptolites from China. Palaeontol Sin Ser B, 14: 1−70
Ting V K. 1947. Geological Reports. Beijing: The National Geological Survey of China. 118−129
Zhan R B, Jin J S. 2007. Ordovician-Llandovery (Silurian) Stratigraphy and Palaeontology of the Upper Yangtze Platform, South China. Beijing: Science Press. 169