华南上奥陶统观音桥层的空间分布和古地理重建

张琳娜^{①②}, 樊隽轩^{①*}, 陈清^③

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;

③ 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

* 联系人, E-mail: fanjunxuan@gmail.com

2016-01-04 收稿, 2016-02-19 修回, 2016-02-20 接受, 2016-04-25 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDB10010100)和国家自然科学基金(41221001, 41290260, U1562213 和 41272042)资助

摘要 观音桥层是晚奥陶世赫南特期在华南上扬子区广泛发育的一套介壳相泥质灰岩地层, 位于五峰组和龙马溪组两套页岩气产出层位之间. 恢复观音桥层的地理分布, 分析其空间分布型式和规律, 将有利于重建华南奥陶纪末期的古地理, 更好地理解华南奥陶纪末生物大灭绝的环境背景, 以及五峰组和龙马溪组黑色页岩形成的古地理背景. 本研究基于GBDB数据库收集、整理和厘定了342条剖面的综合数据, 利用地理信息系统的ArcGIS软件进行空间模拟, 重建了华南上扬子区观音桥层的空间展布. 重建结果显示, 观音桥层广泛分布于上扬子台地的大部分地区, 集中出露于滇东北、黔北、川东南、重庆、鄂西等地, 其中厚度最大的区域呈东西向分布于滇黔桂古陆的北缘, 形成了一个完整的沉积中心区; 而同期的其他岩石地层单元则主要分布于上扬子台地的边缘地区. 同时, 利用各剖面的沉积学与古生物学、古生态学特征推测该时期各地点具体的古水深值, 从而恢复了上扬子区观音桥层沉积期的古地形. 结果表明, 上扬子区在赫南特中期呈现出“一隆三拗”的古地理格局, “一隆”为湘鄂西水下高地, “三拗”为川东南拗陷、湘中拗陷和鄂北拗陷. 这一三面为古陆环绕、局限滞留的古地理环境, 是五峰组和龙马溪组富有机质页岩富集的控制因素之一.

关键词 观音桥层, 赫南特阶, 上扬子区, GBDB 数据库, 地理信息系统, 古地理重建

赫南特阶(Hirnantian)是奥陶系最顶部不足200万年(445.2±1.4~443.8±1.5 Ma, International Chronostratigraphic Chart 2015^[1])的一个年代地层单元. 赫南特阶虽然时限短暂, 但是其中却记录了奥陶纪末一系列重要的地质事件和生物事件, 包括冈瓦纳冰川凝聚所造成的全球海平面下降和海水温度降低^[2~5], 以及由此引发的显生宙第一次, 也是规模第二大的生物集群灭绝事件^[3,6,7]. 华南, 特别是上扬子区, 奥陶-志留系之交地层广泛发育, 这段地层以黑色含笔石页岩为主, 包括五峰组和龙马溪组下段^[8,9], 其间往往夹含一层厚度不大(多在1 m左右)的介壳相泥质

灰岩地层, 即观音桥层(Kuanyinchiao Bed), 其中发育有全球范围内多样性最高的“赫南特贝动物群”(Hirnantia fauna)^[10,11]. 观音桥层虽然厚度不大, 但是其分布广泛, 岩性和所含化石与上下地层区别明显, 易于识别, 因此, 在地表露头 and 井下地层划分与对比中往往以此作为重要的标志层. 此外, 观音桥层的出现和结束, 代表着华南奥陶纪末两次重要的古地理和古环境变化, 且与同期的生物灭绝和更替事件紧密相关, 反映了这一重大生物事件的区域环境背景.

观音桥层最早由张鸣韶和盛莘夫^[12]报道, 随后

引用格式: 张琳娜, 樊隽轩, 陈清. 华南上奥陶统观音桥层的空间分布和古地理重建. 科学通报, 2016, 61: 2053–2063

Zhang L N, Fan J X, Chen Q. Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao Bed in South China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2053–2063, doi: 10.1360/N972015-00981

由卢衍豪^[13]正式命名,命名地点位于重庆市綦江县观音桥。经过数十年的研究,观音桥层的化石系统古生物学^[10,11,14,15]、地层学^[8,11,16,17]、地球化学^[18~20]和古地理学^[21~24]等方面都已取得了一系列重要成果,积累了丰富的数据资料。因此,在此基础上,合理、高效地提取数据,大范围、高精度、定量地实现观音桥层空间分布建模,进一步量化其分布型式和规律,就显得格外重要,这也是进一步从宏观角度深入研究观音桥层分布规律的重要环节。近20年来,数据库和地理信息系统的快速发展,为海量空间数据采集、存储、建模、分析和展示提供了强有力的技术支持,从而使得定量恢复地层的空间展布成为可能。本文基于GBDB在线数据库整理和厘定观音桥层的剖面数据,利用地理信息系统的ArcGIS软件重建观音桥层的空间展布,定量地分析其空间分布型式和规律,并恢复其沉积时期的古地理背景。

1 观音桥层简介

观音桥层自命名以来,其作为一个岩石地层单元的有效性一直存在争议,即应称其为观音桥层^[8,10,13,25]、观音桥组^[26~28]还是观音桥段^[29~31]? 鉴于其地层厚度较薄不足以建组,同时考虑其分布较广且具有明显标志意义,故本文沿用了观音桥层这一命名^[23]。同时,观音桥层的时代归属问题也曾有过大量的讨论,通过对其所含的赫南特贝动物群的研究^[10,11]及其上下黑色页岩笔石生物地层学的研究^[8],

其时代归属和地层对比已有较明确的结论。在上扬子区,观音桥层的底界基本位于*Metabolograptus extraordinarius*带内,顶界则位于*Metabolograptus persculptus*带内^[8,32]。虽然其顶、底界线存在一定的穿时现象^[11],但戎嘉余等人^[23]最近的研究以及收集的数据表明,多数地点的观音桥层整体处于赫南特阶内,层位相对较稳定(图1)。

2 数据和研究方法

2.1 数据准备

高精度、大范围的地层时空分布模拟和古地理研究需要大量剖面数据的支持。随着剖面数量和剖面相关属性数据(如剖面行政地理位置和经纬度、地层岩性、分层、厚度和上下接触关系、化石产出名单等)的快速增加,简单地依靠大脑记忆和手工整理已经无法满足研究工作的需要。近年来,随着计算机、网络和数据库技术的快速发展,在地层古生物领域也逐渐出现了一些大型的数据库,如美国的Paleobiology Database (PaleoDB或PBDB, <https://paleobiodb.org/>)和中国的Geobiodiversity Database (GBDB, <http://www.geobiodiversity.com/>)。这些数据库均按照一定的数据结构进行数据的组织、存储和应用,从而使得大规模数据集的高效管理成为可能。同时,由于所有数据均采用统一的标准和原则进行数字化和存储,因此,数据的录入、检索、厘定和更新等均更加的准确和便

图1 观音桥层及其同期地层的划分与对比^[33]。A代表上扬子区沉积典型观音桥层的广大地区; B代表川北至陕南; C代表四川东南部至云南东北部; D代表湖南西南部至广西东北部

Figure 1 Subdivision and correlation of the Kuanyinchiao Bed and its coeval strata^[33]. A represents the major area of the Upper Yangtze region in which deposits the typical Kuanyinchiao Bed sediments; B represents the area from northern Sichuan to southern Shaanxi; C represents the area from southeastern Sichuan to northeastern Yunnan; D represents southwestern Hunan to northeastern Guangxi

捷,数据的可编辑性、可继承性、可共享性和二次开发的可能性也大大增强.这类数据库的出现,使得本文基于大规模数据集的定量古地理研究成为可能.

GBDB数据库创建于2006年,是一个基于互联网、数据库和GIS技术的古生物学和地层学多用户协同的数字化科研平台^[34,35].该数据库目前也是国际地层委员会(International Commission on Stratigraphy, ICS)和国际古生物协会(International Palaeontology Association, IPA)的官方数据库,承担地层古生物领域的两大学术组织的数据库建设任务,提供权威的在线信息服务. GBDB数据库以“剖面”为核心,整合了各类地层学属性数据与古生物系统分类数据、地理位置数据和文献数据等(图2),同时还集成了多种数据可视化、分析和挖掘工具,如地层信息可视化、地理信息可视化、野外露头360°全景可视化、定量地层对比、古生物多样性统计、古地理重建与分析等.自2007年提供在线服务开始,GBDB团队组织人员系统开展了中国乃至全球地层剖面的数字化工作. GBDB数据库中包含的海量地层数据及基于数据库开发的可视化与分析功能,是本文研究的基础.

本文研究中涉及的剖面主要分为3类:(1)发育观音桥层的剖面;(2)发育与观音桥层同期异相地层的剖面;(3)缺失观音桥层同期沉积的剖面.研究中涉及的剖面数据主要包括剖面名称、行政地理位置和经纬度、岩石地层单位名称(或缺失)、地层厚度、数据来源(参考文献)等,这些数据均按照统一标准录入至GBDB数据库中,并利用GBDB平台进行检索、分类、编辑、审核、厘定等操作.最终,通过筛选整理,我

们共收集、整理了上扬子区观音桥层及同期地层的相关剖面点342条,并利用GBDB数据库的数据导出功能将这342条剖面的数据导出为建模所需的文件格式.

2.2 数据建模

地理信息系统(Geographic Information System, GIS)是在计算机软硬件的支持下,对地理事物空间位置信息及其他属性信息进行采集、存储、管理、分析和显示的空间信息系统^[36].GIS技术和软件为基于大量具有地理位置信息的剖面数据开展定量、精细的地层时空分布重建和数据分析提供了有力的工具.传统的地层空间分布研究,如剖面地理位置的投点标定、地层分布范围的划分圈定、地层厚度等值线图的绘制等工作,均可通过GIS技术和软件更加准确、快捷地实现.更重要的是,通过GIS技术我们可以对剖面的地层学属性数据进行空间分析,确定这些属性的空间分布特点和相互关系,进而对未知区域(如地层覆盖区、未研究区等)进行合理推演,从而帮助我们更好地分析数据在整个区域内的分布特点和规律.例如,传统方法可以基于部分剖面地层厚度手工绘制厚度等值线图,但是其精度通常较低,主观性较强;而在大规模数据集和GIS软件的支持下,不仅可以绘制高精度的厚度等值线图,而且可以根据地层厚度分布情况推测覆盖区该段地层的可能厚度值,同时还能对推演结果进行评价和误差分析.此外,利用GIS技术还可以研究地层厚度中心分布规律、地层厚度变化速率和方向等,这将有助于增加地层学相关研究的精度和深度.本文使用地理信息系统的

图2 GBDB数据库主要的数据库结构和数据资源^[34].虚线框表示正在开发建设的数据模块和资源

Figure 2 Main data structure and sources of the GBDB^[34]. The dashed boxes represent the data modules under developing

ArcGIS软件进行观音桥层的地理分布重建和模拟。ArcGIS软件中有多种插值方法可用于建模,如反距离权重插值、自然邻点插值、径向基函数插值、克里金插值等,本文分别采用自然邻点插值和克里金插值对观音桥层的地理分布和古地形进行重建。

3 重建与分析

3.1 观音桥层的地理分布与厚度分布模式

如上所述,为了研究观音桥层在上扬子区的地理分布及厚度分布特点,我们共收集了342条相关剖面,其中包括发育观音桥层的剖面、发育同期异相地层的剖面 and 缺失同期沉积的剖面。通过将这些剖面投影至华南地区行政底图上(图3),可以发现上扬子区观音桥层主要出露于3个区域:1) 上扬子区南部,包括云南东北角、四川东南角、贵州北部和重庆东南部;2) 湖北西部;3) 重庆西北部城口地区至四川边境,即大巴山地区。此外观音桥层还零星见于湖南北部桃源地区^[22],湖北东部崇阳、咸宁地区^[37-39]和四川

华蓥山地区,但露头相对较少,研究程度较低。四川东部至重庆中部,以及湖北中部地区多为中新生代地层覆盖,没有相关剖面出露,但是根据部分钻井资料及周缘露头区分布可以推断,观音桥层在上述地区亦非常有可能分布。对于绝大多数剖面,观音桥层的岩性为典型的泥质灰岩,含有丰度不同的腕足类和三叶虫等壳相化石。但是在贵州北部遵义董公寺、朱家坡一带,观音桥层的岩性主要为砂质页岩^[22],这可能是由于此处非常靠近滇黔桂古陆(Yunnan-Guizhou-Guangxi Oldland)^[40],碎屑物质较多所造成的。

为了进一步研究观音桥层的地理分布,我们在上述342个剖面的数据集的基础上,进一步提炼出一个包含254个剖面的数据子集。在这一数据子集中,所有剖面的观音桥层均具有准确的地层厚度值,而对于发育同期异相地层的剖面 and 缺失同期沉积的剖面,其对应数值均设为零,以限定观音桥层分布的边界。据此,我们利用ArcGIS软件重建了观音桥层的厚度分布图(图3)。从图中可以发现,上扬子区观音桥层的整体厚度较小,多数地区小于1 m,仅少数地

图3 上扬子区赫南特阶观音桥层的地理分布与厚度等值线图。红色曲线代表华南板块的北界,黑色曲线代表该时期沉积区与缺失区的边界,即古海岸线,红色虚线代表该时期不同沉积地层单元分布区之间的界线

Figure 3 Geographic distribution and isopach map of the Hirnantian Kuanyinchiao Bed in the Upper Yangtze region. The red curve indicates the northern boundary of the South China Palaeoplate; black lines indicate the boundaries between the regions with or without the contemporaneous sediments, namely the palaeocoastlines; red dash lines indicate the boundaries among areas with different sedimentary stratigraphic units

区厚度较大,如贵州凤冈硐卡拉剖面为11.5 m^[41]、贵州桐梓三岔剖面为8 m^[17]、桐梓红花园南坝子剖面近8 m^[17,42]、贵州桐梓红花园山王庙剖面为5.54 m^[28]等。这些厚度较大的区域集中分布于上扬子区南部,即滇东北、黔北、川东南、渝东南等地区,对应于滇黔桂古陆北缘的浅水区,基本平行于古海岸线呈东西向分布,组成了一个完整的沉积中心区。自这一区域向南,观音桥层快速尖灭,进入地层缺失区;向北则厚度逐渐减小,至湘鄂西水下高地(Hunan-Hubei Submarine High^[9,22,43],或称湘鄂西隆起^[44])周缘观音桥层厚度普遍小于0.37 m。

另一方面,厚度模拟结果同样显示出观音桥层在扬子区的覆盖区(四川东部、重庆中部、湖北中部和东部等)可能有着非常广泛的分布范围。虽然其推测厚度很薄,但是由于其存在的可能性非常明显,且地层属性可区分度很强,因此对上述覆盖区钻井中五峰组-龙马溪组黑色页岩地层的划分和对比具有重要作用,应引起足够重视。

3.2 观音桥层沉积期岩相古地理重建

上扬子区观音桥层的上覆地层为龙马溪组黑色

黑岩,下伏地层亦多为五峰组黑色页岩,两者均含有高分异度、高丰度的营浮游生活的笔石动物群,几乎无底栖壳相化石,这与富含腕足类、三叶虫等底栖壳相化石的观音桥层泥质灰岩截然不同,代表了两种不同的沉积环境。为了进一步了解观音桥层沉积的环境背景,我们基于上述数据集重建了观音桥层沉积期的岩相古地理图(图4)。

根据地层中赋存的化石及上下地层序列,在上扬子及周缘地区可以识别出4种类型的地层,这4种类型的地层基本与观音桥层为同期沉积,分别为:(1)四川和陕西交界地区出露南郑组上部,主要为泥岩、粉砂质泥岩夹灰岩地层^[45~47];(2)四川省东南部至云南东北边界地区出露大渡河组和铁足菲克组上部,主要为灰岩夹页岩、砂页岩地层^[44,45,48,49];(3)江西西北部武宁、修水地区出露新开岭层,主要为黑色钙质、碳质泥岩^[50,51];(4)湖南南部至广西东北部出露天马山组或田岭口组中上部,主要为巨厚的砂岩、粉砂岩、页岩韵律层地层^[52~54]。其中,前3种类型代表局限海湾的浅水台地相沉积,第4种类型代表近源、快速堆积的复理石相沉积。具体的沉积相带边界见图3和4。

地层缺失区主要包括沉积区周缘的汉南古陆、川

图4 上扬子区观音桥层沉积分布与同期沉积相带划分

Figure 4 Geographic distributions of the Kuanyinchiao Bed and the coeval sedimentary facies in the Upper Yangtze region

中古陆、滇黔桂古陆、江南古陆和华夏古陆,以及位于扬子台地内部的部分地区,如湖南、湖北交界地区的湘鄂西水下高地、贵州北部至重庆南部的若干“岛屿”^[23]。

整体来看,观音桥层分布在上扬子台地的大部分地区,而同期异相地层则分布于台地的边缘地区。观音桥层与其他同期岩相之间基本呈现出一种渐变关系,除了湖南南部至广西北部出现的巨厚复理石沉积,代表基底快速沉降之外,其他地区整体表现为正常、浅水陆表海环境。这一种总体相带分布格局与稍早的凯迪晚期,即五峰组沉积期大致相同^[55]。两者的主要区别在于广布于上扬子台地的五峰组含笔石黑色页岩,被观音桥层的含壳相动物泥质灰岩所替代。这一岩相、生物相的变化具有两个特点:首先,分布范围广,从上扬子地台最南缘的黔北地区至最北缘的湖北神农架地区均普遍发生了这一转变,同期在下扬子地区也存在类似情况;其次,等时性强,这一岩相、生物相转变基本局限在赫南特期 *M. extraordinarius* 带内。这种相带分布格局不变,而岩相和生物相特征整体地、近等时地发生变化的情况,反映区域内受到统一的、范围性的环境变化影响^[56]。

3.3 观音桥层沉积期的古地形重建

最近基于奥陶纪末观音桥层沉积期,即赫南特中期的300多个剖面点的岩相和生物相特征,判断各剖面的相对古水深等级(划分为I~IV级),在此基础上恢复了华南上扬子区赫南特中期的相对古地形面貌^[33]。在此基础上对数据作了进一步优选,根据其沉积学与古生物学、古生态学特征推测各剖面具体的古水深值,并以水深值为对象重建了华南上扬子区赫南特中期的古地形分布格局。研究结果表明,基于古水深的古地形重建结果与基于古水深值等级的重建结果基本一致,但前者刻画的精度更高、细节更多。通过古水深插值结果可发现上扬子区在赫南特期上扬子区古水深平均为20~30 m,其古地形主要体现为“一隆三拗”的格局(图5)，“一隆”指的是湖南、湖北交界地区的湘鄂西水下高地，“三拗”主要指川东南拗陷,湖南中部、湘鄂西水下高地以南的湘中拗陷,以及湖北北部的鄂北拗陷。在湖北东南部至江西西北部或也存在一个小范围的拗陷,但数据点过少,目前尚存疑问。插值结果还显示鄂北拗陷向北可能进一步加深,但是由于其已邻近华南北缘,由于构造运动造

成的地层破坏、消减,缺乏进一步的地质证据的支持。

华南赫南特中期基本延续了凯迪晚期的古地形格局^[57],但受到赫南特期一系列地质事件的影响,因此两者间古水深和水动力条件存在差异,形成了观音桥层特殊的岩相和生物相特征。这一变化同时受全球和区域两方面因素的影响。首先,由于奥陶纪末南极冰川凝聚造成的全球海平面下降^[2,58],赫南特期扬子陆表海的海水亦随之变浅,同时由于全球冰室效应造成的海水循环加强,从而导致了从还原环境的黑色笔石页岩(五峰组)向基底富氧的含壳相动物群的泥灰岩(观音桥层)的转变;观音桥层中富含的全球广泛分布的凉水型赫南特贝动物群,正是这一冰期事件的产物^[11],随着赫南特冰期的结束,赫南特贝动物群也迅速消亡^[59];其次,晚奥陶世以来,华夏古陆阶段性地向西北方向不断推进,导致了上扬子台地的整体抬升^[53],从而为浅水的观音桥层沉积和赫南特贝动物群的广泛发育创造了条件,另一方面还导致湘鄂西水下高地所在区域抬升加剧,其核心区位于浪基面以上甚至暴露水面,形成大的水下高地或孤岛。关于湘鄂西水下高地在这一过程中整体分布和影响范围的变化过程,笔者等将另撰文论述。

虽然五峰组和龙马溪组累计厚度最大可达到200~300 m,但其中的页岩气有利层段通常只有20~80 m,大致对应于五峰组的 *D. complexus* 带至 *M. extraordinarius* 带和龙马溪组下部的 *M. persculptus* 带至 *Cystograptus vesiculosus* 带^[60]。由于湘鄂西水下高地自奥陶纪凯迪晚期(*P. pacificus* 带)至志留纪鲁丹中、晚期(*C. vesiculosus* 带)长期存在^[9],因此,在上述有机质页岩富集时期,上扬子海基本一直发育了这种三面为古陆环绕、“一隆三拗”的古地理格局,从而形成了一种半封闭、宁静、滞留的古海洋环境,为五峰组和龙马溪组黑色页岩中有机质的富集创造了重要的环境条件。并且,其中的川东南拗陷及周边地区,包括四川东南部、重庆西南部和贵州北部,由于其东部的湘鄂西水下高地的阻塞作用,导致该地区与外海的连通性相对更差,水体更加封闭、滞留,因此,该地区也成为目前页岩气勘探的核心地区,产出了焦石坝、长宁、威远3个五峰组和龙马溪组页岩气田^[60]。

4 结论

在大规模剖面数据集的基础上,利用GBDB数据库和ArcGIS软件对华南上扬子区赫南特期观音桥层

图 5 上扬子区赫南特期的古地形重建。(a) 红线代表华南板块的北界。其北边的插值结果仅为华南地区插值结果向北的自然延伸，以显示观音桥层沉积期古地形向北可能存在变深的情况，由于这一地区后期被构造运动俯冲消减，因此目前尚无可供分析的剖面资料。不同的颜色代表不同的古水深。(b) 上扬子区赫南特中期古地形的三维重现

Figure 5 Palaeotopographic reconstruction of the Upper Yangtze region during the Hirnantian. (a) The red curve indicates the northern boundary of the South China Palaeoplate. The northern area beyond the boundary only represents the natural extension of the interpolation based on available data from South China, which indicates a trend of becoming deeper to the north, but needs stratigraphic evidence from this area that were later subducted. Different colors indicate different palaeo-water depths. (b) 3D palaeotopography of the Upper Yangtze region in the mid-Hirnantian

的空间分布及其古地理背景进行重建研究。通过对观音桥层的厚度分布及其沉积期古水深值进行定量的数值模拟，得到以下结论。

(1) 晚奥陶世赫南特中期上扬子区的大部分地区沉积观音桥层，集中出露于贵州北部、云南东北部、四川东南部、湖北西部和重庆等地，台地边缘则沉积同期其他岩相地层；整体上，观音桥层沉积期相带分布格局与五峰组沉积期大致相同，表现出一定的继承性，但是在岩相、生物相方面有着明显的变化，可能受到受奥陶纪末全球海平面变化下降和华南区构造运动造成基底抬升的双重影响。

(2) 厚度模拟结果表明观音桥层整体厚度较小，多小于1 m。而厚度相对较大的地区则主要呈东西向沿古海岸线分布于滇黔桂古陆的北缘，这一时期，扬子盆地中心区为湘鄂西水下高地，沉积地层缺失，观音桥层环绕于该高地分布。

(3) 古水深模拟结果显示了华南上扬子区赫南特中期三面为古陆环绕，内部呈现“一隆三拗”的古地形格局，“一隆”是湘鄂西水下高地，“三拗”分别指的是川东南拗陷、湘中拗陷和鄂北拗陷。这一局限和半封闭的古地理环境、是五峰组和龙马溪组富有机质页岩富集的控制因素之一。

致谢

在本项研究的设计至成文过程中得到了中国科学院南京地质古生物研究所陈旭、戎嘉余老师的大力支持与鼓励，蒙其仔细阅读文稿并提出了诸多修改建议；美国代顿大学Dan Goldman教授帮助修改英文；审稿人审阅文稿并提出多条重要修改意见，帮助我们提高了文稿质量，在此一并致以诚挚谢意。本文系“Geobiodiversity Database”项目和IGCP591项目“The Early to Middle Palaeozoic Revolution”系列成果之一。

参考文献

- 1 Fan J X, Peng S C, Hou X D, et al. Official website of the International Commission on Stratigraphy and the release of the International Chronostratigraphic Chart (V2015/01) (in Chinese). J Stratigr, 2015, 39: 125–132 [樊隽轩, 彭善池, 侯旭东, 等. 国际地层委员会官网与《国际年代地层表》(2015/01 版). 地层学杂志, 2015, 39: 125–132]
- 2 Brenchley P J, Marshall J D, Carden G A F, et al. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse period. Geology, 1994, 22: 295–298
- 3 Sheehan P M. The Late Ordovician mass extinction. Annu Rev Earth Planet Sci, 2001, 29: 331–364
- 4 Ghienne J F. Late Ordovician sedimentary environments, glacial cycles, and post-glacial transgression in the Taoudeni Basin, West Africa. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2003, 189: 117–145
- 5 Finnegan S, Bergmann K, Eiler J M, et al. The magnitude and duration of Late Ordovician-Early Silurian glaciation. Science, 2011, 331: 903–906
- 6 Raup D M, Sepkoski J J Jr. Mass extinctions in the marine fossil record. Science, 1982, 215: 1501–1503
- 7 Sepkoski J J Jr. Patterns of Phanerozoic extinction: A perspective from global data bases. In: Walliser O H, ed. Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic. Berlin: Springer, 1996. 35–51
- 8 Chen X, Rong J Y, Mitchell C E, et al. Late Ordovician to earliest Silurian graptolite and brachiopod biozonation from the Yangtze region, South China, with a global correlation. Geol Mag, 2000, 137: 623–650
- 9 Fan J X, Melchin M J, Chen X, et al. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 1854–1863 [樊隽轩, Melchin M J, 陈旭, 等. 华南奥陶-志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 130–139]
- 10 Rong J Y. The *Hirnantia* fauna of China with the comments on the Ordovician-Silurian boundary (in Chinese). Acta Stratigr Sin, 1979, 3: 1–29 [戎嘉余. 中国的赫南特贝动物群(*Hirnantia* fauna)并论奥陶系与志留系的分界. 地层学杂志, 1979, 3: 1–29]
- 11 Rong J Y, Chen X, Happer D A T. The latest Ordovician *Hirnantia* Fauna (Brachiopoda) in time and space. Lethaia, 2002, 35: 231–249
- 12 Zhang M S, Sheng X F. The Ordovician strata at the border area between the Sichuan and Guizhou provinces (in Chinese). Acta Geol Sin, 1958, 38: 326–335 [张鸣韶, 盛莘夫. 川黔边境的奥陶纪地层. 地质学报, 1958, 38: 326–335]
- 13 Lu Y H. Subdivision and Correlation of the Ordovician Rocks of Southern China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1959. 1–113 [卢衍豪. 中国南部奥陶纪地层分类和对比. 北京: 地质出版社, 1959. 1–113]
- 14 Zhu Z L, Wu H J. The *Dalmanitina* fauna (trilobites) from Huanghuachang and Wangjiawan, Yichang County, Hubei Province. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China, Ordovician-Silurian Boundary (1). Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1984. 83–104
- 15 Zhan R B, Liu J B, Jin J S, et al. Biodiversification of Late Ordovician *Hirnantia* fauna on the Upper Yangtze Platform, South China. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 1800–1810 [詹仁斌, 刘建波, 靳吉锁, 等. 华南上扬子区晚奥陶世赫南特贝动物群的时空演变. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 1154–1163]
- 16 Chen X, Rong J Y, Fan J X, et al. The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Hirnantian Stage (the uppermost of the Ordovician System). Episodes, 2006, 29: 183–196
- 17 Rong J Y, Chen X, Zhan R B, et al. New observation on Ordovician-Silurian boundary strata of southern Tongzi County, northern Guizhou, Southwest China (in Chinese). J Stratigr, 2010, 34: 337–348 [戎嘉余, 陈旭, 詹仁斌, 等. 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, 2010, 34: 337–348]
- 18 Fan J X, Peng P A, Melchin M J, et al. Carbon isotopes and event stratigraphy near the Ordovician-Silurian boundary, Yichang, South China. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2009, 276: 160–169
- 19 Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. Carbon and sulfur isotopic anomalies across the Ordovician-Silurian boundary on the Yangtze Platform, South China. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2009, 274: 32–39
- 20 Zhang T G, Shen Y A, Zhan R B, et al. Large perturbations of the carbon and sulfur cycle associated with the Late Ordovician mass extinction in South China. Geology, 2009, 37: 299–302
- 21 Rong J Y, Chen X. Faunal differentiation, biofacies and lithofacies pattern of Late Ordovician (Ashgillian) in South China (in Chinese). Acta Palaeont Sin, 1987, 26: 507–535 [戎嘉余, 陈旭. 华南晚奥陶世的动物群分异及生物相、岩相分布模式. 古生物学报, 1987, 26: 507–535]
- 22 Chen X, Rong J Y, Li Y, et al. Facies patterns and geography of the Yangtze region, South China, through the Ordovician and Silurian transition. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2004, 204: 353–372

- 23 Rong J Y, Chen X, Wang Y, et al. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications (in Chinese). *Sci Sin Terrae*, 2011, 41: 1407–1415 [戎嘉余, 陈旭, 王怿, 等. 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*, 2011, 41: 1407–1415]
- 24 Liu W, Xu X S, Yu Q, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Hirnantian in the middle-upper Yangtze region of China (in Chinese). *J Chengdu Univ Technol*, 2012, 39: 32–39 [刘伟, 许效松, 余谦, 等. 中上扬子晚奥陶世赫南特期岩相古地理. *成都理工大学学报*, 2012, 39: 32–39]
- 25 Chen X, Rong J Y, Wang X F, et al. Correlation of the Ordovician Rocks of China. *Int Union Geol Sci Pub*, 1995, 31: 1–104
- 26 Zhang W T, Xu H K, Chen X, et al. Ordovician of northern Guizhou (in Chinese). In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS, ed. *Palaeozoic Rocks of Northern Guizhou*. Nanjing: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS, 1964. 33–78 [张文堂, 许汉奎, 陈旭, 等. 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. 贵州北部的古生代地层. 南京: 中国科学院南京地质古生物所, 1964. 33–78]
- 27 Wang R Z. Summary of the Southwestern China Strata: Ordovician (in Chinese). Chengdu: Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, 1981. 1–115 [王汝植. 西南地区地层总结: 奥陶系. 成都: 成都地质矿产研究所, 1981. 1–115]
- 28 Zhan R B, Jin J S. Ordovician-Early Silurian (Llandovery) Stratigraphy and Palaeontology of the Upper Yangtze Platform, South China. Beijing: Science Press, 2007. 1–169
- 29 Sheng X F. Geological time of the ‘*Dalmanitina* bed’ in China (in Chinese). In: Sheng X F, ed. *Subdivision and Correlation of the Ordovician in China*. Beijing: Geological Publishing House, 1974. 53–95 [盛莘夫. 中国小达尔曼虫(*Dalmanitina*)层的时代. 见: 盛莘夫, 著. 中国奥陶系划分和对比. 北京: 地质出版社, 1974. 53–95]
- 30 Zeng Q L, Ni S Z, Xu G H, et al. Subdivision and correlation on the Ordovician in the eastern Yangtze Gorge, China (in Chinese). In: *Bulletin of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences* 6, 1983. 1–56 [曾庆鑫, 倪世钊, 徐光洪, 等. 长江三峡东部地区奥陶系划分与对比. 见: 中国地质科学院宜昌地质矿产研究所文集(6), 1983. 1–56]
- 31 Zeng Q L, Lai C G, Xu H G, et al. Ordovician (in Chinese). In: Wang X F, Ni S Z, Zeng Q L, et al., eds. *Biostratigraphy of the Yangtze Gorge Area, II: Early Paleozoic Volume*. Beijing: Geological Publishing House, 1987. 43–142 [曾庆鑫, 赖才根, 徐光洪, 等. 奥陶系. 见: 汪啸风, 倪世钊, 曾庆鑫, 等, 编. 长江三峡地区生物地层学(2): 早古生代分册. 北京: 地质出版社, 1987. 43–142]
- 32 Mu E Z, Rong J Y. Review of the Ordovician-Silurian boundary (in Chinese). *J Stratigr*, 1983, 7: 81–91 [穆恩之, 戎嘉余. 论国际奥陶-志留系的分界. *地层学杂志*, 1983, 7: 81–91]
- 33 Zhang L N, Fan J X, Chen Q, et al. Reconstruction of the mid-Hirnantian palaeotopography in the Upper Yangtze region, South China. *Estonian J Earth Sci*, 2014, 63: 329–334
- 34 Fan J X, Zhang H, Hou X D, et al. Quantitative research trends in palaeobiology and stratigraphy—Construction of the GeoBiodiversity database (GBDB) using e-science technology (in Chinese). *Acta Palaeont Sin*, 2011, 50: 141–153 [樊隽轩, 张华, 侯旭东, 等. 古生物学和地层学研究的量化趋势——GBDB 数字化科研平台的建设及其意义. *古生物学报*, 2011, 50: 141–153]
- 35 Fan J X, Chen Q, Hou X D, et al. Geobiodiversity Database: A comprehensive section-based integration of stratigraphic and paleontological data. *Newsl Stratigr*, 2013, 46: 111–136
- 36 Chen S P, Lu X J, Zhou C H. Introduction of Geographic Information System (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999 [陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论. 北京: 科学出版社, 1999]
- 37 Compiling Group of Regional Stratigraphy Chart of Central-South China. *Regional Stratigraphy Chart of Central-South China* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1974. 1–534 [中南地区区域地层表编写组. 中南地区区域地层表. 北京: 地质出版社, 1974. 1–534]
- 38 Liu Y Y, Sun Z H, Yang M S. The Cambrian and Ordovician strata of the southeastern Hubei transitional type (in Chinese). *J Stratigr*, 1984, 8: 94–106 [刘永耀, 孙振华, 杨少铭. 鄂东南过渡类型的寒武纪、奥陶纪地层. *地层学杂志*, 1984, 8: 94–106]
- 39 Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province. *Regional Geology of Hubei Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1990. 1–705 [湖北省地质矿产局. 湖北省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1990. 1–705]
- 40 Liu B J, Xu X S. Atlas of the Lithofacies and Paleogeography of South China (Sinian-Triassic) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994. 1–339 [刘宝珩, 许效松. 中国南方岩相古地理图集(震旦纪-三叠纪). 北京: 科学出版社, 1994. 1–339]
- 41 Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province. *Regional Geology of Guizhou Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1987. 1–698 [贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1987. 1–698]
- 42 Su W B, Wang Y B, Gong S Y. A new Ordovician-Silurian boundary section in Guizhou, South China (in Chinese). *Geoscience*, 2006, 20: 409–412 [苏文博, 王永标, 龚淑云. 一条新发现的奥陶系-志留系界线剖面. *现代地质*, 2006, 20: 409–412]
- 43 Chen X, Rong J Y, Zhou Z Y, et al. The central Guizhou and Yichang uplifts, Upper Yangtze region, between Ordovician and Silurian. *Chin Sci Bull*, 2001, 46: 1580–1584 [陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 等. 上扬子区奥陶-志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升. *科学通报*, 2001, 46: 1052–1056]

- 44 Mu E Z, Zhu Z L, Chen J Y, et al. Ordovician of southwestern China (in Chinese). In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. Biostratigraphy of Carbonate Rocks in Southwestern China. Beijing: Science Press, 1979. 108–154 [穆恩之, 朱兆玲, 陈均远, 等. 西南地区的奥陶系. 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, 1979. 108–154]
- 45 Compiling Group of Regional Stratigraphy Chart of Sichuan. Regional Stratigraphy Chart of Southwest China: Sichuan Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1978. 1–672 [四川省区域地层表编写组. 西南地区区域地层表: 四川省分册. 北京: 地质出版社, 1978. 1–672]
- 46 Compiling Group of Regional Stratigraphy Chart of Shaanxi. Regional Stratigraphy Chart of Northwest China: Shaanxi Province (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1983. 1–257 [陕西省区域地层表编写组. 西北地区区域地层表: 陕西省分册. 北京: 地质出版社, 1983. 1–257]
- 47 Li J J, Cheng H J. Lithological and biotic characteristics of the Nanzheng Formation in the Liangshan area of Hanzhong in Shaanxi Province (in Chinese). Geol Shaanxi, 1988, 1: 31–44 [李积金, 成汉钧. 汉中梁山南郑组的岩性及生物群特征. 陕西地质, 1988, 1: 31–44]
- 48 Mu E Z, Li J J, Ge M Y, et al. Paleogeographic maps of the Late Ordovician in the Central China region and their explanation (in Chinese). J Stratigr, 1981, 5: 165–170 [穆恩之, 李积金, 葛梅钰, 等. 华中区晚奥陶世古地理图及其说明书. 地层学杂志, 1981, 5: 165–170]
- 49 Hu Z G. The ‘*Dalmanitina* bed’ in the lower reaches of Dadu River (in Chinese). J Stratigr, 1980, 4: 29–36 [胡正国. 大渡河下游地区的“达尔曼虫层”. 地层学杂志, 1980, 4: 29–36]
- 50 Yu J H, Xia S F, Fang Y T. Ordovician in the Xiushui Drainage Basin, Jiangxi (in Chinese). J Nanjing Univ Nat Sci, 1976, 2: 57–77 [俞剑华, 夏树芳, 方一亭. 江西修水流域的奥陶系. 南京大学学报(自然科学版), 1976, 2: 57–77]
- 51 Yu J H, Liu H B, Fang Y T. Anisograptidae of the Xinchangian Age (Early Ordovician) from the Xiushui Basin, Jiangxi (in Chinese). Acta Palaeont Sin, 1984, 23: 532–542 [俞剑华, 刘怀宝, 方一亭. 江西修水流域新厂期反称笔石科(Anisograptidae)化石. 古生物学报, 1984, 23: 532–542]
- 52 Chen X, Yang W R, He Z Q, et al. The graptolite-bearing Ordovician of Xing’an, Guangxi (in Chinese). J Stratigr, 1981, 5: 36–45 [陈旭, 杨万容, 何自强, 等. 广西兴安奥陶纪含笔石地层. 地层学杂志, 1981, 5: 36–45]
- 53 Chen X, Fan J X, Chen Q, et al. Toward a stepwise Kwangsi Orogeny. Sci China Earth Sci, 2014, 57: 379–387 [陈旭, 樊隽轩, 陈清, 等. 论广西运动的阶段性. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 842–850]
- 54 Liu Y R, Fu H Y. Graptolites of *Tangyagraptus typicus*-*Yinograptus disjunctus* biozone (W_3) from the Wufeng Formation (Upper Ordovician) of Anhua, Hunan (in Chinese). Acta Palaeont Sin, 1984, 23: 642–648 [刘义仁, 傅汉英. 湖南安化上奥陶统五峰组 *Tangyagraptus typicus*-*Yinograptus disjunctus* 带(W_3)的笔石. 古生物学报, 1984, 23: 642–648]
- 55 Chen Q, Fan J X, Melchin M J, et al. Temporal and spatial distribution of the Wufeng Formation black shales (Upper Ordovician) in South China. GFF, 2014, 136: 55–59
- 56 Page A A, Zalasiewicz J A, et al. Were transgressive black shales a negative feedback modulating glacioeustasy in the Early Palaeozoic Icehouse? In: Williams M, Haywood A M, Gregory F J, et al., eds. Deep-Time Perspectives on Climate Change: Marrying the Signal from Computer Models and Biological Proxies. The Micropalaeontological Society, Special Publications. London: The Geological Society, 2007. 123–156
- 57 Chen Q. Quantitative study on graptolite biodiversity and palaeogeography in South China during the Ordovician and Silurian transition (in Chinese). Doctoral Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. 1–217 [陈清. 华南奥陶-志留纪之交笔石多样性演化及古地理的定量研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2013. 1–217]
- 58 Rong J Y. Ecostratigraphic evidences of the Upper Ordovician regressive sequences in the Upper Yangtze region and the effect of glaciation (in Chinese). J Stratigr, 1984, 8: 19–29 [戎嘉余. 上扬子区晚奥陶世海退的生态地层证据. 地层学杂志, 1984, 8: 19–29]
- 59 Rong J Y, Zhan R B. Late Ordovician brachiopod mass extinction of South China (in Chinese). In: Rong J Y, Fang Z J, eds. Mass Extinction and Recovery—Evidences from the Palaeozoic and Triassic of South China. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004. 71–96, 1040 [戎嘉余, 詹仁斌. 华南晚奥陶世腕足动物的大灭绝. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 编. 生物大灭绝与复苏——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, 2004. 71–96, 1040]
- 60 Zou C N, Dong D Z, Wang Y N, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (I) (in Chinese). Petrol Explor Dev, 2015, 42: 689–701 [邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一). 石油勘探与开发, 2015, 42: 689–701]

Geographic distribution and palaeogeographic reconstruction of the Upper Ordovician Kuanyinchiao Bed in South China

ZHANG LinNa^{1,2}, FAN JunXuan¹ & CHEN Qing³

¹ State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Key Laboratory of Economic Stratigraphy and Palaeogeography, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

The Kuanyinchiao Bed (Hirnantian, Upper Ordovician) is mostly composed of argillaceous limestone and yields the world-famous, cold-water shelly fauna—‘*Hirnantia* fauna’. It occurs between two black shale units—the Wufeng and Lungmachi formations, and is widely distributed in the Upper Yangtze region of South China. Its consistent lithology, unique fauna, and wide distribution, make it an important marker bed for the stratigraphic subdivision and correlation of regional Ordovician-Silurian boundary rocks, both in outcrop and in drill core. Identification of the Kuanyinchiao Bed is especially important in the recognition of the Wufeng and Lungmachi black shales in the shale gas investigation in South China. Palaeogeographic reconstructions of the occurrence of the Kuanyinchiao Bed can enhance our understanding of the palaeogeographic background of the Late Ordovician mass extinction and the formation of the Wufeng and Lungmachi black shales.

In the present study, data from 342 Hirnantian sections (outcrops and drill cores) were collected and standardized through the online Geobiodiversity Database. Geographic Information System (GIS) software was used for the reconstruction of the geographic distribution of the Kuanyinchiao Bed in the Upper Yangtze region. First, a paleogeographic lithofacies map of the study interval and an isopach map of the Kuanyinchiao Bed were constructed based on lithological data and the thickness of the Kuanyinchiao Bed, respectively. The results show that the Upper Yangtze region in the mid-Hirnantian was surrounded by four major oldlands: Central Sichuan Oldland in the west, Yunnan-Guizhou-Guangxi Oldland in the southwest, Cathaysian and Jiangnan oldlands in the east. The Kuanyinchiao Bed is widely distributed in most area of the Upper Yangtze region, intensively in northeastern Yunnan, northern Guizhou, southeastern Sichuan, Chongqing and western Hubei. Coeval strata with different lithologies only occur at the border area of the Upper Yangtze region. The Kuanyinchiao Bed is thickest to the north of the Yunnan-Guizhou-Guangxi Oldland, parallel to the paleo-shoreline. The result of interpolation based on thickness measurements also indicates that the Kuanyinchiao Bed may also occur in the subsurface of the Upper Yangtze region, the areas of eastern Sichuan and westernmost Chongqing, and possibly the area of northern Chongqing.

Second, we reconstructed the palaeotopography of the mid-Hirnantian Upper Yangtze region by inferring the palaeo-water depth values of each section according to its sedimentologic, palaeontologic and palaeoecologic characteristics. The result shows an apparent “one uplift and three depressions” palaeogeographic pattern during the study interval. The uplift represents the Hunan-Hubei Submarine High, while the three depressions comprise the southeastern Sichuan depression, the central Hunan depression and the northern Hubei depression, respectively. The semi-restricted and stagnant palaeogeographic setting is one of the key factors that influence the deposition of the organic-rich Wufeng and Lungmachi black shales in the Upper Yangtze region.

The southeastern Sichuan depression and its neighboring area are presently the major areas for shale gas investigation, and three important gas fields have been found at Jiaoshiba, Changning and Weiyuan of this area. This area was circulation restricted because of the existence of the Hunan-Hubei Submarine High. The submarine high appeared in late Katian and disappeared in mid-Rhuddanian. It acted as a bay barrier restricting the water exchange between the depression area and the open ocean, and made the depression isolated and stagnant, which benefited the production of organic-rich sediments.

Kuanyinchiao Bed, Hirnantian, Upper Yangtze region, GBDB, GIS, palaeogeographic reconstruction

doi: 10.1360/N972015-00981