

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2020.6.7

# 云南曲靖刘家冲剖面关底组中的鱼类微体化石及其地层学意义

王建华<sup>1</sup>, 赵文金<sup>2,3,4,\*</sup>, 朱敏<sup>2,3,4</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 蔡家琛<sup>2,3,4</sup>, 张娜<sup>5</sup>, 彭礼健<sup>1</sup>, 罗彦超<sup>2,3,4</sup>

1. 曲靖师范学院 自然历史文化研究中心, 云南 曲靖 655011
2. 中国科学院 古脊椎动物与古人类研究所 中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 北京 100044
3. 中国科学院 生物演化与环境卓越创新中心, 北京 100044
4. 中国科学院大学, 北京 100049
5. 云南大学 深时陆地生态研究所, 云南 昆明 650091

WANG Jianhua<sup>1</sup>, ZHAO Wenjin<sup>2,3,4,\*</sup>, ZHU Min<sup>2,3,4</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, CAI Jiachen<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Na<sup>5</sup>, PENG Lijian<sup>1</sup>, LUO Yanchao<sup>2,3,4</sup>

1. Research Center of Natural History and Culture, Qujing Normal University, Qujing 655011, China
2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences; Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China
3. Center for Excellence in Life and Paleoenvironment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
5. Institute of Deep Time Terrestrial Ecology, Yunnan University, Kunming 650091, China

WANG Jianhua, ZHAO Wenjin, ZHU Min, et al. Microvertebrate remains from the Kuanti Formation of the Liujiachong Section in Qujing, Yunnan and their stratigraphic significance. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(6): 329-340

**Abstract:** The Kuanti Formation, with the discovery of the Xiaoxiang Vertebrate Fauna in 2007, has become the focus of global research on early vertebrates. However, its stratigraphic subdivision, correlation and age, especially the subdivision and age of its lower part, remain contentious, despite many biostratigraphic attempts made since 1914. In recent years, we conducted a series of extensive geological investigations in the Kuanti Formation near the Xiaoxiang Reservoir in Qujing, Yunnan Province. Based on the recently obtained data from the Liujiachong Section (dominated by the lower part of the Kuanti Formation) and the preliminary study of the newly discovered microvertebrate remains, we documented the sequence of the Kuanti Formation of the Liujiachong Section, and further explored the geological age of the related strata. The Kuanti Formation of the Liujiachong Section can be subdivided into three members, in ascending order according to the main lithological changes: Member I (Yuejiashan Member), Member II (Chongjiawan Member), and Member III (Cailian Member). The lower part of Member I is characterized by light yellow and yellow-green gravelly silty mudstones and calcareous siltstones lacking any fossils, while the upper part is composed of dark grey and grey-black carbonaceous shales with rare *Lingula* sp. and bivalves. Member II is dominated by grey-green and purple-red shales, intercalated with light grey thin-bedded or lenticular

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-05-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类、A类)(XDB26000000, XDA19050102); 国家自然科学基金项目(41530102, 41972006); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC002); 中国科学院古生物化石发掘与修理专项(KL213406); 云南省基础研究计划青年项目(202001AU070145)

作者简介: 王建华(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事与古脊椎动物学相关的地层学和古地理学研究。E-mail: wangjianhua@mail.qjnu.edu.cn

\* 通信作者简介: 赵文金(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事古脊椎动物学及相关的地层学、古动物地理学研究。E-mail: zhaowenjin@ivpp.ac.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2020, 27(6)

limestones or bioclastic limestones containing many invertebrate fossils (brachiopods and crinoid stems) and abundant microvertebrate remains. Member III, partially exposed in the section, is composed of purple-red and grey-green silty and calcareous mudstones or marls intercalating with minor purple-red or yellow-green shales or siltstones containing brachiopods, fish, and stout tubular trace fossils. A thin layer of medium-thick-bedded fine sandstone is developed on the bottom of the member, which marks the boundary between Members III and II. The microvertebrate remains from several beds in Member II show high diversity, including four early vertebrate groups: agnathans, placoderms, acanthodians, and osteichthyans. They are characterized by the Yangtze Fish Assemblage of the Xiaoxiang Vertebrate Fauna. The discovery of the acanthodians *Nostolepis* spp. in this section reveals the stratigraphic correlation and the precise geological age of the lower part of the Kuantu Formation. Based on the acanthodians from Member II, coupled with previous palaeontological data, we suggest the age of Member II to be late Gorstian Stage of the Ludlow, in the Silurian. The upper part of Member I, containing the placoderm '*Wangolepis*', might be referred to as early Gorstian. However, the age of the lower part of Member I without fossils is uncertain, and the possibility of its base extending down to the Wenlock is not excluded. This study offers new palaeoichthyological evidence for the Silurian biostratigraphy of China and provides a new chronostratigraphic scheme in the study of early vertebrate evolution.

**Keywords:** microvertebrate remains; Kuantu Formation; Liujiachong Section; subdivision and correlation; Qujing; Yunnan

**摘要:** 云南曲靖地区的关底组产出世界闻名的潇湘脊椎动物群(Xiaoxiang Vertebrate Fauna),但其地层的划分对比和时代归属一直存有争议,特别是其下部地层的划分及时代归属争议最大。通过在曲靖城南以关底组下段地层为主的刘家冲剖面上开展详细的野外及室内地层古生物学研究工作,文章厘清了该剖面上的志留纪地层,并依据来自数个层位样品中丰富的鱼类微体化石材料探讨了关底组下部的地质时代。研究表明:刘家冲剖面上出露的志留纪地层根据岩性变化特征可划分为关底组 I 段(岳家山段)、II 段(崇家湾段)和 III 段(彩莲段);I 段的下部以浅黄色、浅黄绿色含砾粉砂质泥岩、钙质粉砂岩为主,未见化石,而上部以深灰色、灰黑色页岩为主,含少量腕足类 *Lingula* sp. 及双壳类;II 段则以灰绿色、暗紫红色页岩互层、并夹薄层状灰岩为主,从下往上灰岩夹层逐渐增多,含丰富的腕足类、海百合茎等无脊椎动物化石及鱼类微体化石;在关底组 III 段地层中首次发现的鱼类微体化石多样性高,门类比较齐全,包括无颌类、盾皮鱼类、棘鱼类和硬骨鱼类四大早期脊椎动物类群,从鱼群组成面貌上看隶属于潇湘脊椎动物群扬子鱼类组合(Yangtze Fish Assemblage)。笔者主要依据对其中棘鱼类的全球对比分析研究,并在结合牙形类等无脊椎动物化石研究进展及新认识的基础上,深入探讨了关底组下部 I 段及 II 段的地质时代。关底组 II 段的时代应为志留纪罗德洛世高斯特晚期(late Gorstian, Ludlow),关底组 I 段含砾岩层之上、含盾皮鱼类“王氏鱼”(Wangolepis)的地层,则应归入罗德洛世高斯特早期(early Gorstian, Ludlow),而在该剖面上尚未发现鱼类化石的关底组 I 段下部,目前还不能确定全部归入高斯特阶(Gorstian),有可能会下延到温洛克统(Wenlock)之中。文章中相关工作的开展,不仅为中国志留纪生物地层的精深研究提供了古鱼类学方面的可靠证据,而且为探讨早期脊椎动物演化提供了新的地质年代意见。

**关键词:** 鱼类微体化石;关底组;刘家冲剖面;划分与对比;曲靖;云南

**中图分类号:** P52;P534.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2020)06-0329-12

云南曲靖地区的志留系,最初由丁文江先生于 1914 年开展研究工作,由王曰伦先生于 1937 年整理发表并正式命名,时称马龙系,包括关底组、妙高组和玉龙寺组 3 个岩石地层单元<sup>[1]</sup>,其中关底组的命名剖面位于滇东马龙县西部的关底村(又名关下村)至寻甸县的易隆之间,曲靖城西的岳家山剖面为其参考剖面<sup>[2]</sup>。曲靖地区的关底组岩性组合多变,

缺少志留纪第一主导门类化石笔石,而第二主导化石门类牙形类亦多为时代跨度较大分子,以往记录的常见化石,又多为延续时间较长的腕足类、珊瑚和少量双壳类,这造成了关底组的划分对比和时代问题长期处于争议较多的局面。2007 年以来,在曲靖的关底组中相继产出了一些在早期脊椎动物演化中占据关键节点位置的鱼类化石(如梦幻鬼鱼<sup>[3]</sup>、初始

全颌鱼<sup>[4]</sup>、长吻麒麟鱼<sup>[5]</sup>等), 相关地层的划分对比与时代的精确确定显得尤为重要, 缺少化石记录的关底组下段的时代归属, 实际上也是华南志留系基础地质研究中的重要问题之一。10余年来, 笔者所在的早期脊椎动物研究课题组在曲靖及周边地区开展了大量的野外地质考察工作与鱼类化石的发掘及深入研究工作, 为关底组地层的划分与对比及其时代的讨论提供了翔实的第一手野外地质资料和可靠的古鱼类学依据。

本文结合新近在曲靖城区以南刘家冲一带新出露的关底组地层剖面的实测对比分析及室内鱼类微体化石的研究, 在前人古生物学研究与地层学划分对比工作的基础上, 主要依据岩性变化与古生物化石特征, 对曲靖地区刘家冲剖面上的关底组进行了划分和与邻近地区同期地层的对比, 并深入讨论了其时代归属。本文中相关工作的开展, 为中国志留纪生物地层的精深研究提供了古鱼类学方面的有效手段。

## 1 刘家冲剖面描述

曲靖城南约 5 km 的刘家冲剖面是随着城市建设南拓而新出露的一个志留系连续剖面, 露头完好, 岩层产状稳定, 受构造作用影响不大。对比课题组前期在潇湘水库以西上铁路—东坡剖面对关底组的重新厘定与划分对比研究<sup>[6]</sup>, 刘家冲剖面上出露的志留系关底组主要相当于上铁路—东坡剖面的关底组 I 段(岳家山段)及 II 段(崇家湾段), 并包括少量出露不完整的关底组 III 段(彩莲段)(图 1)。相对而言, 刘家冲剖面的关底组 II 段产有更为丰富的灰岩夹层和透镜体。剖面详细描述如下。

### 志留系关底组

#### 彩莲段(III段)未到底

- 18 土黄色中厚层状石英细砂岩, 具细砂质结构, 中厚层状构造, 主要成分为石英, 有少量长石和绢云母; 其间可见土黄色泥岩夹层, 向上渐变为紫红色、土黄色粉砂质泥岩。石英细砂岩局部可见斜层理, 单层厚度 10~20 mm; 岩石中节理发育, 局部细砂岩层被切割呈碎块状 8.66 m

#### 崇家湾段(II段)厚 317.38 m

- 17 紫红色、土黄色粉砂质泥岩, 岩石具弱风化, 偶见双壳类 3.48 m
- 16 灰黑色、灰绿色钙质页岩, 其间可见厚度 10~40 mm 不等的灰岩夹层, 上部为页岩与灰岩互层产出。距本层底

- 6 m 处样品 LJQ-22W 中含鱼类微体化石 17.32 m
- 15 土黄色夹灰绿色钙质页(泥)岩, 风化后常呈土块状, 偶见薄层状灰岩夹层 2.59 m
- 14 灰绿色、暗紫色钙质页岩, 泥质结构、页理构造, 主要由黏土矿物构成; 岩石具弱风化、局部破碎; 其间常夹灰色灰岩透镜体, 厚度 2~10 cm, 局部为生物碎屑灰岩透镜体并见双壳类。距本层底 0.5、3、12 m 处的样品 LJQ-1W、LJQ-2W 及 LJQ-9W 中, 均含鱼类微体化石 26.58 m
- 13 灰绿色、暗紫红色页岩互层, 含数层灰色、紫红色含生物碎屑灰岩薄层, 厚度 2~8 cm 不等。上部为硬化道路覆盖, 推测为本层 108.91 m
- 12 土黄色泥岩, 局部夹灰色含生物碎屑灰岩薄层, 厚度约 5 cm。下部为道路覆盖, 推测为本层 10.52 m
- 11 灰色厚层状生物碎屑灰岩, 生物碎屑可见腕足类、海百合等, 上部为硬化道路覆盖, 推测为本层 29.77 m
- 10 紫红色泥(页)岩与灰色中厚层状生物碎屑灰岩互层, 生物碎屑多为腕足类、海百合茎等 9.80 m
- 9 灰绿色页岩, 夹灰岩薄层, 厚度多为 2~20 cm 不等, 部分灰岩夹层内可见腕足类等生物碎屑, 但含量明显偏低 34.11 m
- 8 灰绿色、暗紫红色页岩互层, 夹厚度为 2~10 cm 不等的灰岩薄层; 本层局部常见虫管, 部分灰岩夹层中可见腕足类等生物碎屑。距本层底 30 m 处样品 L110719W 中含鱼类微体化石 40.64 m
- 7 暗紫色、灰黑色页岩互层, 夹土黄色厚度不超过 10 cm 的生物碎屑灰岩薄层 12.22 m
- 6 暗紫色、灰黑色页岩互层, 其间局部可见直径 1 cm 左右的虫管 21.44 m
- 岳家山段(I段)厚 37.51 m
- 5 深灰色、灰黑色页岩, 岩石劈理十分发育, 致使岩石多破碎成黄豆大小的细碎片, 常见腕足类 *Lingula* sp. 及双壳类 20.91 m
- 4 浅黄色含砾钙质粉砂岩, 未见化石 2.53 m
- 3 浅黄色、浅黄绿色含砾粉砂质泥岩、粉砂岩, 局部夹浅黄色砾岩、紫红色含砾粉砂质泥岩, 砾石砾径大小 0.5~4 cm 不等, 多为棱状、次棱状, 磨圆和分选均较差, 砾石成分主要为泥质岩, 总体上从底部往上砾的大小和密度均降低, 未见化石 14.07 m

-----平行不整合-----

### 寒武系双龙潭组: 未到底

- 2 土黄色、黄绿色泥岩, 局部夹紫红色绢云母泥岩, 偶见薄层状粉砂岩, 未见化石 62.58 m
- 1 灰白色、浅黄色白云岩、粉砂岩, 未见化石 2.02 m

如上所述, 刘家冲剖面上的志留系总体上为关底组下部的地层, 主要相当于上铁路—东坡剖面的关底组 I 段(岳家山段)及 II 段(崇家湾段)。刘家冲剖面关底组 I 段的岩性总体上以浅黄色含砾粉砂

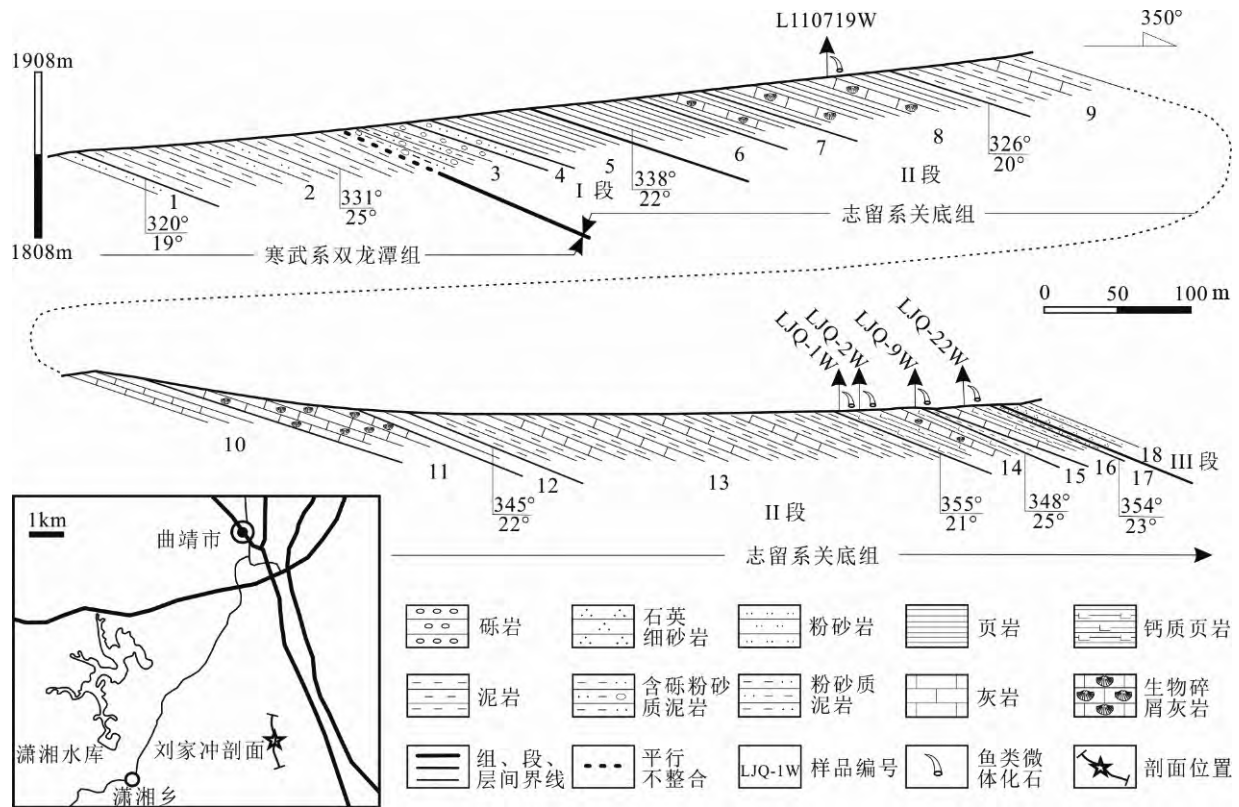


图 1 曲靖刘家冲关底组剖面  
Fig. 1 Kuanti Formation of the Liujiachong Section in Qujing

岩、粉砂质泥岩(图 2A)及深灰色、灰黑色页岩为主,底部常以含分选很差的棱状、次棱状砾石的砾岩为主(图 2B),随后向上从砂岩、细砂岩渐变为粉砂岩,直至全部变为泥岩、页岩;本段内化石较少,顶部仅见少量腕足类 *Lingula* sp.;相较于上铁路—东坡剖面,含砾粉砂质泥岩或粉砂岩明显增厚,但总体上地层厚度变薄,从 143.82 m 变化至 37.51 m。关底组 II 段的岩性以灰绿色、暗紫红色泥页岩夹灰岩薄层为主,并夹薄层状或透镜状灰岩、生物碎屑灰岩(图 2C, F, G),无脊椎动物化石与鱼类微体化石均十分丰富(图 2D, E; 图 3);相较于上铁路—东坡剖面,红层相对减少、灰色灰岩薄层相对增多,且总体上厚度变厚,从 178.11 m 变化至 317.38 m。

## 2 刘家冲剖面鱼类微体化石研究

### 2.1 样品处理

在刘家冲关底组剖面中采集处理的鱼类微体化石样品分为两类:一类是少量采自关底组 I 段下部含砾碎屑岩的样品,在实验室内主要用石油醚进行处理;另一类为占主体的采自关底组 II 段中发育的

灰岩、含生物碎屑灰岩夹层或透镜体样品,主要在曲靖师范学院自然历史文化研究中心实验室内进行处理,采用以下酸处理流程。

**泡样:**将块状岩石样品置于托盘中,用 70% 的原醋酸(浓度 8%)和 30% 的醋酸缓冲液(浓度 <2%)浸泡、反应,主要在酸处理实验室通风橱内进行。

**洗样:**待 2~3 天反应渐弱后,将托盘放置于水槽内,用弱水流冲洗,直至醋酸全部被清除,然后将样品置于烘干橱内烘干。

**初选:**对洗过烘干的每个样品进行细致的观察,将其中暴露较多且肉眼可辨的大化石挑选出来,置于烘干橱内烘干,然后用胶水加固裂缝,并做好化石的相关记录,以备后期进行化石鉴定与研究。

**筛样:**在弱水流下,用粒径 0.1 mm、0.6 mm、2 mm 的三层筛子筛选泡下来的细样,随后将在每个样品中所获取的粒径分别为 0.1~0.6 mm 与 0.6~2 mm 的两套筛洗出来的细样烘干,并分别收集。

**重复泡样、洗样、初选、筛样过程:**重复以上泡



A—关底组 I 段; B—关底组 I 段下部砾岩; C—关底组 II 段; D—关底组 II 段腕足动物化石; E—关底组 II 段虫管化石; F, G—关底组 II 段内生物碎屑灰岩。

图 2 曲靖刘家冲剖面关底组野外照片

Fig. 2 Field photos of the Kuanti Formation of the Liujiachong Section in Qujing

样、洗样、初选、筛样过程 10 次,直至有较多细样泡出来。

**重液分选:**用多钨酸锂将经过上述处理过程后获取的粒径分别为 0.1~0.6 mm 与 0.6~2 mm 的细样进行重液分选,分选出的化石经冲洗、烘干后收集起来,并做好化石的相关记录,以备后期化石鉴定与研究。

**微体化石挑选、鉴定:**在显微镜下进一步人工挑选每个样品中的微体化石,并对选出的微体化石开展形态学分类、鉴定与显微照相等相关工作。

## 2.2 鱼类微体化石特征

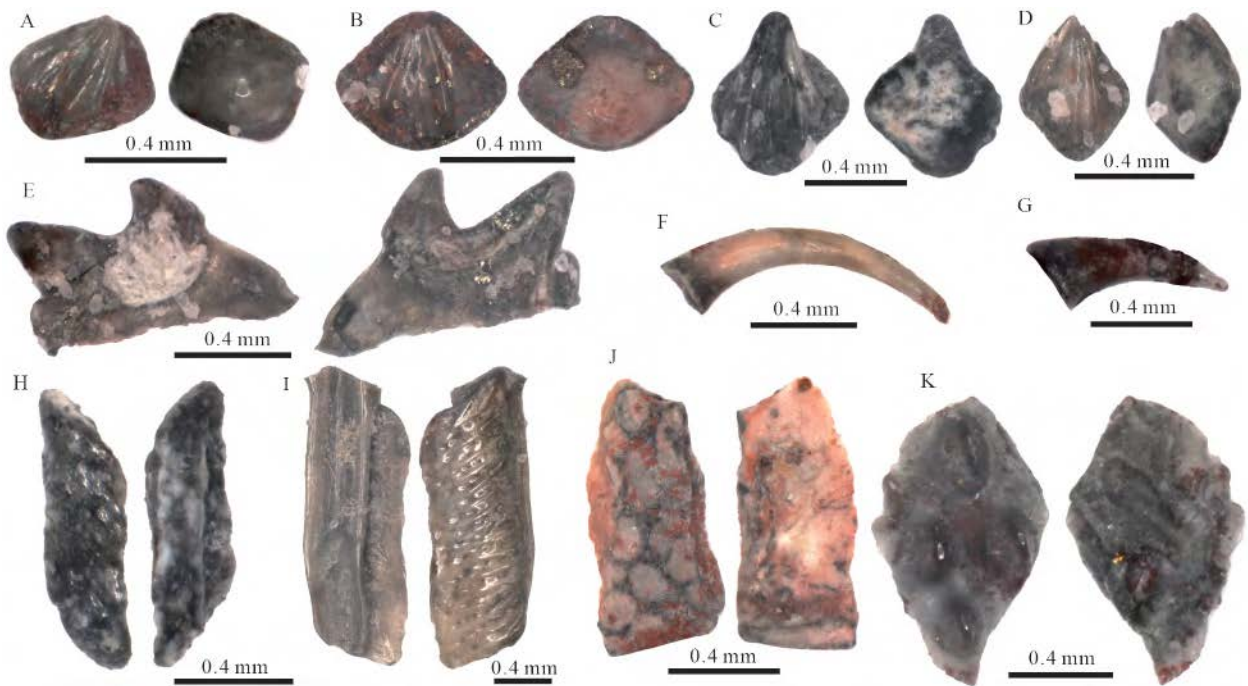
刘家冲关底组剖面中,目前已处理好的鱼类微体化石,主要产自关底组 II 段(图 1;图 2C, F, G)的灰岩薄层或透镜体中,而关底组 I 段中的砾岩样品,因用石油醚处理流程复杂且周期较长,目前尚未有所发现。刘家冲关底组 II 段中鱼类微体化石的种类比较丰富,可见无颌类、盾皮鱼类、棘鱼类、硬骨鱼类的鳞片、牙齿以及骨片,主要以棘鱼类、硬骨鱼类的鳞片及牙齿等鱼类微体化石为主,总体保存状况良好,化石局部见黄铁矿化(图 3),深入研究还在进行

当中。本文中现仅对部分鱼类微体化石做如下简单形态学描述及介绍。

**棘鱼类:**刘家冲剖面关底组 II 段灰岩薄层或透镜体中, 含有丰富的栅棘鱼类 (*Climatiida*) 鳞片化石及少量的锉棘鱼类 (*Ischnacanthida*) 不完整颌骨化石, 后者在本段上部及下部地层中均有发现, 而前者栅棘鱼类鳞片化石目前仅见于本段上部的灰岩透镜体或夹层, 在样品 LJQ-2W 中最为丰富, 并多为栅棘鱼类背棘鱼 (*Nostolepis*) 的体部鳞片 (图 3A, B, C, D)。新发现的鳞片在形态上与 *N. sinica*、*N. striata* 及 *N. consueta*、*N. musca* 均相似, 但是在华南发现的 *N. striata* 通常具有颈脊纹, 基部非常突出; *N. sinica* 具颈孔, 颈环较明显<sup>[7-8]</sup>; 而在欧洲波罗的海周边地区常见的 *N. consueta* 的冠面前缘具有数量较多的短脊纹, 通常不超过冠面的三分之一; *N. musca* 的冠面倾斜, 颈前缘后缘均可见颈孔。这与新发现的背棘鱼新材料均明显不同, 故本文将新发现的材料暂定为 3 个未定种 (*Nostolepis* spp.)。其中, 标本 IVPP V26680. 1 (图 3A) 与 IVPP V26680. 2 (图 3B) 应为背棘鱼属中的同一个

新种, 本文中将其命名为 *N. sp. 1*, 主要形态特征包括鳞片冠部呈三角形且相对于基部较小, 基部呈菱形且较突出, 鳞片冠面由两条纵长的细脊纹组成且向后延伸并在末端聚拢, 鳞片具有较为光滑的次级冠面, 无颈环且颈部只在后缘发育等。标本 IVPP V26681 (图 3C) 与标本 IVPP V26680 (图 3A, B) 的形态特征明显存在一些差别, 应为背棘鱼属另一新种, 本文中称之为 *N. sp. 2*, 其主要特征包括鳞片冠部倾斜, 基部近正方形且较突出, 冠面具 3 条纵脊纹且两边的纵脊纹一直向后延伸至后缘聚拢, 具较为光滑的次级冠面等。标本 IVPP V26682 (图 3D) 的形态特征与前述提及的背棘鱼类均不同, 亦应为背棘鱼属一新种, 本文中将其命名为 *N. sp. 3*, 其主要特征包括鳞片整体呈水滴状, 冠部前缘未延伸出基部, 但后缘略延伸出基部, 基部轻微突出, 冠面具 6 条纵脊纹且皆向后延伸、在末端聚拢, 鳞片颈环不明显等。

除大量背棘鱼体部鳞片新材料以外, 还发现一些不完整的锉棘鱼类下颌。本文中选用的一个标本 IVPP V26683, 虽然仅保存两个齿尖, 但齿尖和基部



A-E—棘鱼类, 其中 A, B 为栅棘鱼类背棘鱼未定种 1 (*Nostolepis* sp. 1, IVPP V26680. 1, 2), C 为栅棘鱼类背棘鱼未定种 2 (*Nostolepis* sp. 2, IVPP V26681), D 为栅棘鱼类背棘鱼未定种 3 (*Nostolepis* sp. 3, IVPP V26682), E 为锉棘鱼类下颌 (IVPP V26683); F, G—硬骨鱼类牙齿 (IVPP V26684. 1, 2); H, I—硬骨鱼类斑鳞鱼 (*Psarolepis*) 鳞片 (IVPP V26685. 1, 2); J—无颌类不完整骨片 (IVPP V26686. 1); K—盾皮鱼类不完整骨片 (IVPP V26686. 2)。

图 3 刘家冲剖面关底组中的鱼类微体化石

Fig. 3 Microvertebrate remains from the Kuanti Formation of the Liujiachong Section

紧密融合(图 3E), 是棘鱼类铗棘鱼目下颌的典型特征<sup>[9-10]</sup>。

**硬骨鱼类:**在刘家冲剖面上发现的该类鱼化石新材料主要为牙齿与鳞片, 常见于样品 LJQ-1W、LJQ-9W 与 LJQ-22W。其中的牙齿化石应为硬骨鱼类的牙齿, 本文中选用的两枚牙齿化石——标本 IVPP V26684.1 与 IVPP V26684.2, 从总体来看, 牙齿均细长且表面光滑, 由基部到冠部逐渐变细且略向后倾斜, 并且基部具有髓腔(图 3F, G)。而本文中选用的两枚鳞片化石——标本 IVPP V26685.1 与 IVPP V26685.2, 均为斑鳞鱼(*Psarolepis*)的鳞片(图 3H, I), 尽管这两枚鳞片标本在大小上有一定差别, 但均具有典型的斑鳞鱼鳞片的形态特征, 如鳞片较厚且呈菱形, 高大于长, 冠面具大量小孔, 具龙骨突(keel)和关节突(peg)结构等, 应为斑鳞鱼不同身体部位的鳞片<sup>[11-13]</sup>。

**无颌类与盾皮鱼类:**在刘家冲剖面上除采获前述棘鱼类、硬骨鱼类的化石新材料外, 我们还发现了无颌类与盾皮鱼类一些细小且不完整的骨片(图 3J, K), 主要见于样品 LJQ-9W 与 LJQ-22W。其中无颌类的不完整骨片一般较厚, 在标本 IVPP V26686.1 的背面有呈近圆形且不规则排列的扁平瘤点, 其腹面则较平且无任何纹饰(图 3J); 而盾皮鱼类的骨片明显与无颌类的不同, 如在标本 IVPP V26686.2 的背面发育有规则排列的突起瘤点, 腹面可见明显的似覆压区的结构(图 3K)<sup>[14-18]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 曲靖地区刘家冲剖面关底组的划分

丁文江和王曰伦两位先生在 20 世纪 30 年代正式命名了关底组<sup>[1]</sup>, 但众多关于曲靖地区包括关底组在内的志留纪地层和古生物方面的研究主要始于 20 世纪 60 年代, 且其定义与划分几经变化、争议不断(表 1)。1964 年, 云贵石油勘探处 102 队将 Ting 和 Wang<sup>[1]</sup>定义的关底组下部非红层的岩性段单独划分出来, 并命名为岳家大山群(后常被称为岳家大山组或岳家山组)<sup>[19-22]</sup>。云南省地质局第二区域地质测量大队在 1978 年完成的 1:200 000 曲靖幅区域地质调查工作中, 实测了曲靖潇湘水库地区的志留系, 按岩性将关底组划分为上、下两段<sup>[23]</sup>。下段岩性为紫红色、褐红色泥质页岩、钙质泥质粉砂岩夹灰绿色钙质页岩、灰色泥质灰岩、灰色中厚层灰岩,

底部与寒武系或下奥陶统呈平行不整合接触, 不整合面上多有砾岩、砂砾岩、沉积角砾岩或含砾砂岩, 最大厚度 694.4 m, 化石十分丰富; 而上段由灰绿色、黄绿色夹灰黑色泥质页岩、钙质页岩夹灰色泥灰岩、泥质灰岩、白云岩化灰岩和白云质灰岩所组成, 最大厚度 369.7 m, 与下段整合接触; 上段与下段的主要区别是, 上段岩层主要为灰绿色、黄紫色, 普遍夹灰色, 未见紫红、褐红色, 其上部还夹少量灰黑色; 关底组与上覆妙高组的区分, 主要以瘤状灰岩的大量出现作为标志, 这一定义扩大了关底组上限的最初定义范围, 并得到了后期研究者的支持<sup>[24-25]</sup>。曹仁关在 1994 年将曲靖地区的关底组及妙高组均二分, 分别谓之岳家山组、潇湘组及红庙组、妙高组<sup>[26]</sup>, 此划分方案导致了曲靖地区志留系的划分更为复杂化。近年来国内同仁通过对黔西赫章志留纪晚期小菜采贝动物群(*Retziella* Fauna, Late Silurian brachiopod)及曲靖地区志留纪无洞贝类(*Atrypida*)的研究, 认为曲靖地区妙高组之下的地层从下到上的岩性特征相似, 且腕足类等无脊椎动物化石组合面貌上无本质差异, 建议取消从关底组单独划分出的岳家山组, 将妙高组之下的志留系统称为关底组<sup>[27-28]</sup>, 该观点得到了戎嘉余等<sup>[29]</sup>的支持。可见, 对关底组的定义与划分长期以来一直颇具争议。最近蔡家琛等<sup>[6]</sup>根据前人研究以及近年来在曲靖潇湘水库周边地区关底组的地层和鱼化石等方面的研究, 将关底组定义为以细碎屑岩为主的一套滨浅海相沉积, 其岩性以黄绿色、灰绿色、紫红色页岩、粉砂质页岩、粉砂质钙质泥岩、泥质粉砂岩为主, 夹泥灰岩、灰岩及细砂岩薄层, 富含腕足类、珊瑚、双壳类、介形虫与鱼类化石; 同时将该组自下而上分为 4 个略有差别的岩性段, 分别为 I 段(岳家山段)、II 段(崇家湾段)、III 段(彩莲段)和 IV 段(东坡段)(表 1)。重新厘定的关底组在滇东地区广泛出露, 厚度变化较大, 通常为 230~930 m, 其与下伏下寒武统龙王庙组或中寒武统双龙潭组呈平行不整合接触, 与上覆妙高组呈整合接触并以浅灰色瘤状灰岩的出现作为妙高组的开始。

本文采纳了蔡家琛等<sup>[6]</sup>对关底组定义及划分的新认识, 并据此对刘家冲剖面中出露的志留系进行了划分, 该剖面中的志留系主要包括关底组下部的两个岩性段——岳家山段与崇家湾段。其中, 岳家山段地层厚仅 37.51 m, 下部以浅黄色、浅黄绿色含砾粉砂质泥岩、钙质粉砂岩为主, 未见化石; 而上部

表 1 云南曲靖地区志留系划分沿革表  
Table 1 Evolution of the subdivision of Silurian strata in Qujing, Yunnan

地层系统		Ting & Wang 1937	云贵石油勘 探处102队 1964	云南省地质局 1978	方润森等 1985	曹仁关 1994	林宝玉等 1998	林宝玉等 2017	戎嘉余等 2019	蔡家琛等 2020	
志留系	普里道利统	419.2±3.2 (Ma)	玉龙寺组	玉龙寺组	玉龙寺组	玉龙寺组	玉龙寺组	玉龙寺组	西屯组	玉龙寺组	
									下西山村组		
		423.0±2.3	妙高组	妙高组	妙高组	上段	妙高组	妙高组	妙高组	玉龙寺组	妙高组
										妙高组	
	425.6±0.9	关底组	潇湘水库组	关底组	上段	下段	关底组	关底组	关底组	IV段	
										关底组	III段
	427.4±0.5	侯墨阶	岳家大山群	岳家大山群	关底组	关底组	关底组	岳家山组	岳家山组	II段	
										岳家山组	I段
	430.5±0.7	申伍德阶	岳家大山群	岳家大山群	岳家山组	岳家山组	岳家山组	岳家山组	岳家山组	?	
										岳家山组	
433.8±0.8	伍德阶			地层缺失							

则以深灰色、灰黑色页岩为主,含少量腕足类 *Lingula* sp. 及双壳类。崇家湾段在刘家冲剖面上出露厚度为 317.38 m,以灰绿色、暗紫红色页岩互层、并夹薄层状灰岩为主,从下往上灰岩夹层逐渐增多,并含丰富的腕足类、海百合茎等化石。本文中报道的鱼类微体化石主要产自关底组 II 段内的灰岩夹层。

### 3.2 刘家冲剖面关底组的地质时代

笔石、牙形类是解决志留系时代归属与对比等地质学重要问题的第一、第二主导门类化石,但由于在曲靖地区的关底组中至今尚未发现笔石化石,发现的牙形类 *Ozarkodina crispa* 带化石的时代归属也存有质疑<sup>[6,22,29]</sup>,使得学界对关底组的精确地质时代迄今尚未取得一致意见,其地质时代归属主要有以下 4 种方案:(1)全部划归温洛克统(Wenlock)<sup>[2,20,24,30-32]</sup>;(2)其下部(相当于关底组 I 段)可归入温洛克统,其上部(相当于关底组 II~IV 段,原称关底组+妙高组下段)归入罗德洛统(Ludlow)<sup>[22,33-34]</sup>;(3)全部划归罗德洛统<sup>[35-46]</sup>;(4)全部划归罗德洛统上部<sup>[29,47-49]</sup>。

通常,在缺少以无脊椎动物为主导门类化石的

志留纪地层中,鱼类微体化石特别有助于解决志留纪地层的精细划分与对比等重要地层学问题<sup>[49]</sup>。戎嘉余等<sup>[29]</sup>指出:志留纪鱼类及其微体化石多产自近岸浅水海相沉积物中,以往常被忽视;近年来,志留纪鱼类的系统分类学、生物地层学研究越来越深入,精美的化石不断被发现,演化生物学和地层对比意义也逐渐显现。可见,鱼类化石的研究,将能够为我国志留纪含鱼地层的划分对比及其地质时代归属提供可靠的古鱼类学证据。

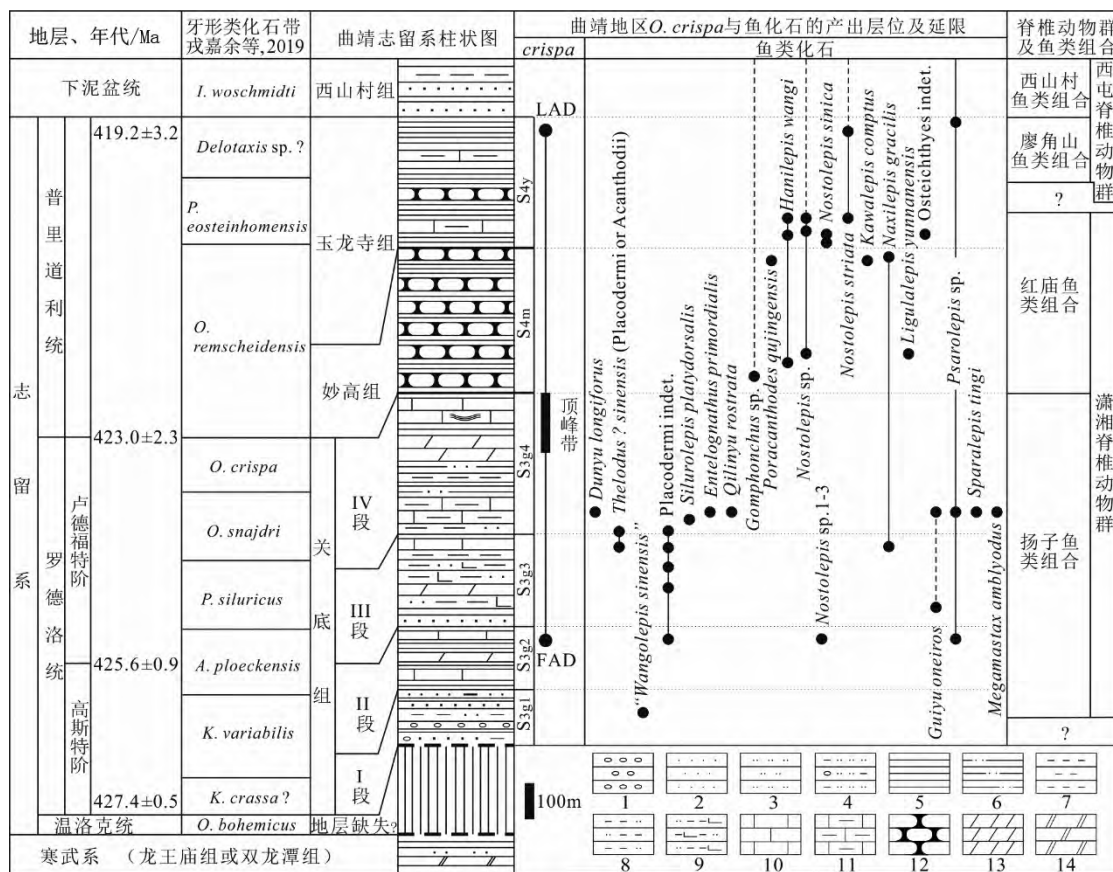
曲靖地区广布的关底组中的鱼类化石,尽管非常丰富且多样,包括盔甲鱼类、盾皮鱼类、硬骨鱼类等大化石及棘鱼类、硬骨鱼类等微体化石,但是这些鱼化石主要产自关底组 III 段和 IV 段<sup>[6,48-50]</sup>。此外,在关底组 I 段的中部,采获过一直以裸名的方式在文献中被提及而未被详细描述的“中华王氏鱼”(Wangolepis sinensis)<sup>[33,48-49]</sup>,而在关底组 II 段中迄今尚无鱼类化石的发现与报道。此次在曲靖地区刘家冲剖面上关底组 II 段中发现丰富的鱼类微体化石,为关底组特别是关底组下部地质时代归属的探讨提供了新的依据。



根据曲靖周边地区志留系中鱼化石的类型及分布特征, Zhu 等<sup>[3]</sup>在 2009 年首次命名了潇湘脊椎动物群 (Xiaoxiang Vertebrate Fauna), 随后的综合研究识别出该动物群的两个鱼类化石组合——分别赋存于关底组及妙高组—玉龙寺组下部之内的扬子鱼类组合 (Yangtze Fish Assemblage) 与红庙鱼类组合 (Hongmiao Fish Assemblage)<sup>[6, 48-50]</sup>, 其中扬子鱼类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, 而红庙鱼类组合主要以棘鱼类及硬骨鱼类的繁盛为特征<sup>[48-49]</sup>。依据鱼类微体化石的全球对比及对曲靖地区志留纪牙形类 *O. crispa* 带分布时限的新认识——利用该种的顶峰带 (限于关底组 IV 段上部) 而不是延限带 (关底组 II 段上部—玉龙寺组) 来确定曲靖地区的 *O. crispa* 带位置 (图 4), 蔡家琛等<sup>[6]</sup>认为: 潇湘脊椎动物群的扬子鱼类组合主要时限限于罗德洛世 (Ludlow), 红庙鱼类组合则主要限于普里道利世 (Pridoli), 并推断富含潇湘脊椎动物群的主体层位,

即关底组 III 段—IV 段的地层可归入到罗德洛统卢德福特阶 (Ludfordian, Ludlow), 其下的关底组 I 段中部—II 段的地层, 则可归入到罗德洛统高斯特阶 (Gorstian, Ludlow), 而关底组 I 段下部地层在目前缺乏化石证据的前提下, 是全部归入高斯特阶还是部分下延到温洛克统, 仍需古生物学研究工作的深入开展 (表 1)。

刘家冲剖面关底组 II 段中丰富鱼类微体化石的新发现, 无疑为关底组地质时代归属的探讨提供了古鱼类学的新证据。前已述及, 刘家冲剖面关底组 II 段中的鱼类化石, 主要包括无颌类、盾皮鱼类、棘鱼类、硬骨鱼类的鳞片、牙齿以及碎骨片, 并以棘鱼类、硬骨鱼类的鳞片及牙齿等鱼类微体化石为主, 从组合类型及面貌上来看, 无疑应归入潇湘脊椎动物群的扬子鱼类组合, 其中最丰富的棘鱼类主要为栅棘鱼类, 鳞片大多属于背棘鱼 (*Nostolepis*) 的体部鳞片 (图 3A, B, C, D)。背棘鱼是全球广布的一类棘鱼类, 最早出现于志留纪温洛克世 (Wenlock), 常见



1—砾岩; 2—细砂岩; 3—粉砂岩; 4—含砾泥质粉砂岩; 5—页岩; 6—粉砂质页岩; 7—泥岩; 8—粉砂质泥岩; 9—钙质粉砂质泥岩; 10—薄层灰岩; 11—泥质灰岩; 12—瘤状灰岩; 13—泥灰岩; 14—白云岩。

图 4 曲靖地区志留系综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive histogram of Silurian strata in Qujing

于志留纪普里道利世(Pridoli, Silurian)—早泥盆世布拉格期(Pragian, Early Devonian)的地层中<sup>[8,11,48-61]</sup>,目前我国最早的背棘鱼,即迭部背棘鱼(*N. tewonensis*)出现于志留纪温洛克世晚期(Late Wenlock)<sup>[49,52-53]</sup>。本文中新发现的背棘鱼类化石在形态上与*N. consueta*、*N. musca*及*N. sinica*、*N. striata*等相似,其中在欧洲波罗的海周边地区广泛分布的背棘鱼*N. consueta*延限较长,在温洛克统一普里道利统(Pridoli)中均有报道<sup>[61]</sup>;而全球广布的背棘鱼*N. striata*,则是普里道利世*Mono-spina erecta*化石带的代表分子<sup>[61]</sup>,在曲靖地区,该种常见于玉龙寺组,且同层往往见有*N. sinica*<sup>[7-8]</sup>。另外,在更老的地层妙高组下部,也发现了与阿尔及利亚普里道利世背棘鱼极为相似的化石材料<sup>[8]</sup>。上述事实指示,曲靖地区含有背棘鱼的妙高组与玉龙寺组下部的时代无疑应归入普里道利世,这也得到了曲靖地区罗德洛世晚期的*O. crispa*带(顶峰带)限于关底组Ⅳ段上部的支持<sup>[6]</sup>。

基于上述讨论,曲靖地区关底组的地质时代上限不会晚于普里道利世,下限不会早于温洛克世中期(图4),这与近年依据关底组中盾皮鱼类“王氏鱼”(Wangolepis)与盔甲鱼类盾鱼(Dunyu)的发现,将含鱼化石的关底组置于罗德洛统的结论并不矛盾,而且基本一致<sup>[49]</sup>。本文中在刘家冲剖面关底组Ⅱ段中新发现的与*N. consueta*等相似的背棘鱼化石材料,指明曲靖地区背棘鱼的最低层位可达关底组崇家湾段,这与在潇湘水库附近发现曲靖地区牙形类*O. crispa*的最低层位(原文中认为是岳家山组上部,野外对比发现相当于本文中的关底组Ⅱ段上部)相当,而*O. crispa*在欧洲最低可下延到罗德洛世高斯特晚期(late Gorstian)<sup>[62]</sup>,因此相关地层——关底组Ⅱ段的地质时代,最有可能归属于罗德洛世早期(图4)。结合近年来对我国南方志留纪地层及古生物化石的综合分析结果,尤其是近年来早期脊椎动物研究团队对云南曲靖地区关底组鱼类化石相关地质时代的认识<sup>[6,48-49]</sup>,在刘家冲剖面关底组Ⅱ段中新发现的背棘鱼,进一步指明相关含鱼化石地层的时代应为志留纪罗德洛世高斯特晚期,关底组Ⅰ段含砾岩层之上含盾皮鱼类“Wangolepis”地层的时代,则可归入罗德洛世高斯特早期(early Gorstian),而在该剖面上尚未发现鱼类化石的关底组Ⅰ段下部的地层,目前还不能确定全部归入高斯特阶(图4)。新近在另一条剖面关底组Ⅰ段

含砾岩层中已处理出来少量牙形类及鱼类微体化石,初步分析表明,其下部有可能会下延到温洛克统之中。

## 4 结论

在云南曲靖潇湘水库周边地区广泛出露的关底组自命名以来,虽经国内众多地层古生物学专家开展了大量的研究工作,但由于缺乏志留纪标准化石笔石,以及在该组中发现的牙形类*O. crispa*的时代归属一直存疑<sup>[6,22,29]</sup>,其精确地质时代迄今在学界未达成共识,特别是其下部的时代归属争议最大。笔者在新近暴露于曲靖城南、以关底组下段地层为主的刘家冲剖面上开展了详细的野外及室内的地层古生物学研究工作,并在数个层位样品中发现了丰富的鱼类微体化石,其为关底组下部地层的划分对比及时代讨论提供了可靠的古鱼类学依据。本文取得的进展与新认识主要包括以下几个方面。

(1)实测了刘家冲剖面,并将该剖面上出露的志留纪地层根据岩性变化特征,划分为关底组Ⅰ段(岳家山段)、Ⅱ段(崇家湾段)和Ⅲ段(彩莲段),其中Ⅰ段中红层不发育,未见灰岩薄层或透镜体,而Ⅱ段中红层及灰岩薄层或透镜体均相当发育;该剖面上的关底组Ⅰ段及Ⅱ段,在潇湘水库周边地区均广泛出露并能很好对比。

(2)在刘家冲剖面关底组Ⅱ段地层中,首次发现了门类齐全且丰富的鱼类微体化石,包括无颌类、盾皮鱼类、棘鱼类、硬骨鱼类的鳞片、牙齿以及碎骨片,从鱼群组成面貌上看,无疑应隶属于潇湘脊椎动物群扬子鱼类组合。

(3)主要依据棘鱼类的全球对比分析研究,在结合对牙形类等无脊椎动物化石的研究进展及新认识的基础上,探讨了关底组下部Ⅰ段及Ⅱ段的地质时代,关底组Ⅱ段的时代应为志留纪罗德洛世高斯特晚期,关底组Ⅰ段含砾岩层之上的地层,则应归入罗德洛世高斯特早期,而在该剖面上关底组Ⅰ段下部目前尚未发现鱼类化石,还不能确定全部归入高斯特阶。

郝诒纯先生1943年从国立西南联合大学地质地理气象学系毕业后,曾短暂在云南工作,为西南边疆的地质事业贡献了力量。在先生诞生100周年之际,谨以此文对先生致以崇高的敬意!并感谢审稿人提出的宝贵意见。

## 参考文献

- [1] TING V K, WANG Y L. Cambrian and Silurian formations of Malung and Chütsing districts, Yunnan[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1937, 16(1): 1-28.
- [2] SUN Y C, WANG H C. Silurian stratigraphy of the Malung and Kutsing districts, eastern Yunnan[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1946, 26(1): 83-100.
- [3] ZHU M, ZHAO W J, JIA L T, et al. The oldest articulated osteichthyan reveals mosaic gnathostome characters[J]. Nature, 2009, 458(7237): 469-474.
- [4] ZHU M, YU X B, AHLBERG P E, et al. A Silurian placoderm with osteichthyan-like marginal jaw bones[J]. Nature, 2013, 502(7470): 188-193.
- [5] ZHU M, AHLBERG P E, PAN Z H, et al. A Silurian maxillate placoderm illuminates jaw evolution [J]. Science, 2016, 354(6310): 334-336.
- [6] 蔡家琛, 赵文金, 朱敏. 云南曲靖志留纪含鱼地层关底组的划分与时代[J]. 古脊椎动物学报, 2020, 58(4). DOI: 10.19615/j.cnki.1000-3118.200513
- [7] GAGNIER P Y, JAHNKE H, SHI Y. A fish fauna of the Lower Yulongsi Formation (Upper Silurian) of Qujing (E. Yunnan, S.W. China) and its depositional environment[J]. Courier Forschungs-Institut Senckenberg, 1989, 110: 123-135.
- [8] 王念忠, 董致中. 中国志留纪鱼类微体化石的首次报道[J]. 古生物学报, 1989, 28(2): 192-206.
- [9] BURROW C J. Acanthodian dental elements from the Trundle beds (Lower Devonian) of New South Wales[J]. Records of the Western Australian Museum, 1995, 17(3): 331-341.
- [10] BURROW C J. Acanthodian fishes with dentigerous jaw bones: the Ischnacanthiformes and *Acanthodopsis*[J]. Fossils and Strata, 2004, 50: 8-22.
- [11] 王念忠. 广西中部下泥盆统无颌类和鱼类微体化石[J]. 古生物学报, 1992, 31(3): 280-303.
- [12] BURROW C J. Form and function in scales of *Ligulalepis toombsi* Schultze, a palaeoniscoid from the Early Devonian of Australia[J]. Records of the South Australian Museum, 1994, 27(2): 175-185.
- [13] QU Q M, ZHU M, WANG W. Scales and dermal skeletal histology of an early bony fish *Psarolepis romeri* and their bearing on the evolution of rhombic scales and hard tissues [J]. PLoS One, 2013, 8(4): e61485.
- [14] BURROW C J. Placoderm scales from the Lower Devonian of New South Wales, Australia[J]. Modern Geology, 1996, 20: 351-369.
- [15] BURROW C J. Devonian microvertebrates from Longmenshan, Sichuan, China: taxonomic assessment[J]. Courier Forschungs-Institut Senckenberg, 2000, 223: 391-451.
- [16] BURROW C J. Earliest Devonian gnathostome microremains from central New South Wales (Australia) [J]. Geodiversitas, 2003, 25(2): 273-288.
- [17] BURROW C J. Placoderm fauna from the Connemarra Formation (?late Lochkovian, Early Devonian), central New South Wales, Australia[J]. Alcheringa, 2006, 30(Special Issue 1): 59-88.
- [18] GAI Z K, ZHU M, JIA L T, et al. A streamlined jawless fish (Galeaspida) from the Lower Devonian of Yunnan, China and its taxonomic and paleoecological implications [J]. Vertebrata Palasiatica, 2015, 53(2): 93-109.
- [19] 林宝玉. 中国地层 6, 中国的志留系[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [20] 方润森, 江能人, 范健才, 等. 云南曲靖地区中志留世一早泥盆世地层及古生物[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1985.
- [21] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [22] 林宝玉, 黄枝高, 李明, 等. 中国志留系若干问题的探讨 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [23] 云南省地质局第二区域测量大队. 中华人民共和国 1/20 万曲靖幅区域地质调查报告(G-48-XX, 地质部分)[R]. 昆明: 云南省地质局, 1978.
- [24] 丁春鸣. 滇东曲靖地区志留纪四射珊瑚的动物群特征及地层时代讨论[J]. 现代地质, 1988, 2(1): 20-33.
- [25] 林宝玉, 苏养正, 朱秀芳, 等. 中国地层典志留系[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [26] 曹仁关. 云南曲靖志留系的划分和对比[J]. 地层学杂志, 1994, 18(2): 149-153.
- [27] 黄冰, 戎嘉余, 王悻. 黔西赫章志留纪晚期小菜采贝动物群的发现及其古地理意义[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 31-37.
- [28] 周航行, 黄冰. 云南曲靖志留系关底组腕足类无洞贝 *Atrypa poidea foxi* Jones 居群分析[J]. 古生物学报, 2018, 57(1): 52-65.
- [29] 戎嘉余, 王悻, 詹仁斌, 等. 中国志留纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(1): 93-114.
- [30] WANG H C. The Silurian rugose corals of northern and eastern Yunnan[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1944, 24(1/2): 21-32.
- [31] WANG H C. New material of Silurian rugose corals from Yunnan[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1947, 27(1): 171-192.
- [32] 陈均远, 刘耕武, 陈挺恩. 华中及西南地区志留纪鹦鹉螺动物群[J]. 中国科学院南京地质古生物研究所集刊, 1981, 13: 1-162.
- [33] 潘江. 中国志留纪脊椎动物群的初步研究[J]. 中国地质科学院院报, 1986, 15: 161-190.
- [34] PAN J, DINELEY D L. A review of early (Silurian and Devonian) vertebrate biogeography and biostratigraphy of China[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1988, 235(1278): 29-61.

- [35] 王尚启, 刘正明, 李治本, 等. 云南曲靖晚志留世和早泥盆世介形类[J]. 微体古生物学报, 1992, 9(4): 363-389.
- [36] 何心一, 陈建强. 滇东曲靖地区晚志留世四射珊瑚动物群[J]. 古生物学报, 2004, 43(3): 303-324.
- [37] 伍鸿基. 西南地区志留-泥盆纪三叶虫的新属种及其地层意义[J]. 古生物学报, 1977, 16(1): 95-117.
- [38] 戎嘉余, 杨学长. 西南地区志留系的石燕及其地层意义[J]. 古生物学报, 1978, 17(4): 357-386.
- [39] 戎嘉余, 杨学长. 简论滇东的志留纪地层[J]. 地层学杂志, 1981, 5(1): 64-67.
- [40] 葛治洲, 戎嘉余, 杨学长, 等. 西南地区的志留系[M]//中国科学院南京地质古生物研究所. 西南地区碳酸盐生物地层. 北京: 科学出版社, 1977: 155-220.
- [41] 王成源. 云南曲靖上志留统牙形刺[J]. 古生物学报, 1980, 19(5): 369-378.
- [42] 王成源. 华南志留系红层的时代[J]. 地层学杂志, 1998, 22(2): 127-128.
- [43] 王成源. 云南曲靖地区关底组的时代[J]. 地层学杂志, 2001, 25(2): 125-127.
- [44] 王成源. 中国志留纪牙形刺[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2013.
- [45] WALLISER O H, WANG C Y. Upper Silurian stratigraphy and conodonts from the Qujing District, East Yunnan, China [J]. Courier Forschungs-Institut Senckenberg, 1989, 110: 111-121.
- [46] GENG L Y, QIAN Z S, DING L S, et al. Silurian chitinozoans from the Yangtze Region[J]. Palaeoworld, 1997(8): 1-152.
- [47] 戎嘉余, 陈旭, 王成源, 等. 论华南志留系对比的若干问题[J]. 地层学杂志, 1990, 14(3): 161-177.
- [48] ZHAO W J, ZHU M. A review of Silurian fishes from Yunnan, China and related biostratigraphy [J]. Palaeoworld, 2015, 24(1/2): 243-250.
- [49] 赵文金, 朱敏. 中国志留纪鱼化石及含鱼地层对比研究综述[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 185-202.
- [50] ZHAO W J, ZHU M. Siluro-Devonian vertebrate biostratigraphy and biogeography of China[J]. Palaeoworld, 2010, 19(1/2): 4-26.
- [51] WANG N Z. Thelodont, acanthodian, and chondrichthyan fossils from the Lower Devonian of southwest China [J]. Proceedings of the Linnean Society of New South Wales, 1984, 107(3): 419-441.
- [52] 王念忠, 王俊卿, 张国瑞, 等. 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[J]. 古脊椎动物学报, 1998, 36(4): 268-281.
- [53] 王伟. 云南丽江早泥盆世棘鱼类微体化石的首次报道[J]. 古脊椎动物学报, 2003, 41(1): 1-16.
- [54] ZHAO W J, WANG N Z, ZHU M, et al. The microvertebrate remains and assemblage sequences across the Silurian-Devonian transition in West Qinling, China [J]. Vertebrata Palasiatica, 2012, 50(4): 309-321.
- [55] BURROW C J, YOUNG G C. The acanthodian fauna of the Craven Peaks Beds (Early to Middle Devonian), western Queensland [J]. Memoirs of the Queensland Museum, 2005, 51(1): 3-25.
- [56] BURROW C J, TURNER S, NOWLAN G S, et al. Vertebrate microremains from the Late Silurian of Arisaig, Nova Scotia, Canada [J]. Journal of Paleontology, 2013, 87(6): 1041-1059.
- [57] BURROW C J, MURPHY M A. Early Devonian (Pragian) vertebrates from the northern Roberts Mountains, Nevada [J]. Journal of Paleontology, 2016, 90(4): 734-740.
- [58] VALIUKEVIČIUS J. New Silurian nostolepids (Acanthodii, Pisces) of Lithuania [J]. Geologija, 2003, 42: 51-68.
- [59] VALIUKEVIČIUS J. New Wenlock-Pridoli (Silurian) acanthodian fishes from Lithuania [J]. Acta Palaeontologica Polonica, 2004, 49(1): 147-160.
- [60] VALIUKEVIČIUS J. Silurian acanthodian succession of the Lūžņi-4 borehole (Latvia) [J]. Acta Universitatis Latviensis, 2004, 679: 119-147.
- [61] VALIUKEVIČIUS J. Silurian acanthodian biostratigraphy of Lithuania [J]. Geodiversitas, 2005, 27(3): 349-380.
- [62] VIIRA V, ALDRIDGE R J. Upper Wenlock to Lower Pridoli (Silurian) conodont biostratigraphy of Saaremaa, Estonia, and a correlation with Britain [J]. Journal of Micro-palaeontology, 1998, 17(1): 33-50.