

doi: 10.13745/j.esf.2014.02.014

中国志留纪鱼化石及含鱼地层对比研究综述

赵文金, 朱 敏

中国科学院 脊椎动物演化与人类起源重点实验室; 中国科学院 古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044

ZHAO Wenjin, ZHU Min

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

ZHAO Wenjin, ZHU Min. A review of the Silurian fishes from China, with comments on the correlation of fish-bearing strata. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(2): 185-202

Abstract: The Silurian fishes from China are characterized by their unique characteristics, high diversity, wide geographic distribution and early stratigraphic occurrence. These fossil materials have provided critical data in the quest for early vertebrate evolution, such as the origin of jaws, the origin and early diversification of crown gnathostomes, the origin of osteichthyans, and the early diversification of sarcopterygians. They have also offered reliable paleoichthyological evidence for some regional stratigraphic issues, exemplified by the subdivision and correlation of Silurian fish-bearing strata and the definition of several geological boundaries in China. We summarize eleven distinctive Silurian fish assemblages in China: the Wentang and Tataaiertage assemblages (early Telychian of Llandovery), the Fentou and Yimugantawu assemblage (middle Telychian), the Maoshan assemblage (late Telychian), the Miaogou assemblage (Homerian of Wenlock), the Yangtze and Keziertage assemblages (early-middle Ludfordian of Ludlow), the Hongmiao assemblage (late Ludfordian of Ludlow), and the Liaojiaoshan and Yanglugou assemblages (Pridoli). In the light of these assemblages, we corroborate that the Silurian shallow marine red beds in the Yangtze area of South China occurred mainly in three horizons, i. e., the lower Telychian of Llandovery (Lower Red Beds), the upper Telychian of Llandovery (Upper Red Beds), and the early-middle Ludfordian of Ludlow (Ludlow Red Beds). We also discuss the subdivision, correlation and geological age of the Silurian red sandstones and mudstones (also termed the “Old Red Rock Series”) exposed in the northwestern margin of the Tarim Basin, and review the study of the Silurian-Devonian Boundary in South China on the basis of the fish assemblages and the chemostratigraphic results.

Key words: fossil fishes; correlation of fish-bearing strata; Silurian; China

摘 要: 中国志留纪的鱼类化石具有特征独特、门类齐全、产出地点及层位多、出现时代早等特点, 这些化石材料不仅为探讨颌的起源、有颌类冠群的起源与早期分化、硬骨鱼类的起源、肉鳍鱼类的早期分化等演化生物学课题提供了关键资料, 而且为中国志留纪含鱼地层的划分与对比、一些重要地质界线的确定等地层学问题提供了可靠的古鱼类学证据。文中总结了 11 个各具特色的中国志留纪鱼类化石组合, 包括温塘组合与塔塔埃塔格组合(兰多维列世特列奇早期)、坟头组合与依木干他乌组合(特列奇中期)、茅山组合(特列奇晚期)、庙沟组合(温洛克世侯墨期)、扬子组合与克兹尔塔格组合(罗德洛世卢德福特早—中期)、红庙组合(卢德福特晚期)、廖角山组合与羊路沟组合(普里道利世), 据此证实了志留纪的浅水海相红层在华南扬子地区主要有 3 个

收稿日期: 2013-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB821902); 国家自然科学基金项目(40930208, 41272029)

作者简介: 赵文金(1968—), 男, 研究员, 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, 2014, 21(2)

层位——特列奇阶下部(下红层)、特列奇阶上部(上红层)和卢德福特阶中下部(罗德洛统红层),讨论了塔里木盆地西北缘发育的一套古生代含鱼化石红色岩系的划分、对比与时代归属,并对基于鱼类化石组合辅以化学地层学手段在华南不同相区开展的志留系-泥盆系界线研究做了综述。

关键词:鱼化石;含鱼地层对比;志留纪;中国

中图分类号:P539.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2014)02-0185-18

在生命演化史中,泥盆纪常被称为“鱼类时代”。近 50 余年来,全球志留纪鱼类化石的连续发现已使我们能够将“鱼类时代”推前至志留纪^[1-12]。化石记录表明,志留纪是脊椎动物演化史上的一个关键时期,无颌类已相当繁盛,有颌类所有重要类群如盾皮鱼纲、棘鱼纲、硬骨鱼纲和软骨鱼纲等皆已出现并逐渐得到发展。志留纪鱼类化石为探讨颌的起源、有颌类冠群的起源与早期分化、硬骨鱼类的起源、肉鳍鱼类的早期分化等生命史中的一系列重大课题提供了关键资料和实证^[13-15]。

志留纪鱼类化石通常发现在滨浅海近岸-浅水-斜坡相区^[3,16-19],不同地质年代各具特色的鱼类化石组合往往可以与海生无脊椎动物尤其是牙形类生物带相对比^[20-22]。自国际地质对比计划(IGCP)“328”项目实施以来,在全球主要古地理分区的志留系和泥盆系中逐步建立了鱼类大化石组合序列及微体化石组合序列,在波罗的海等研究历史较长的地区甚至建立起鱼类微体化石生物带^[7,21,23-25],可以与牙形类带、笔石带等相对比,使其在志留纪、泥盆纪地层划分对比的研究中起到越来越重要的作用。

中国志留纪地层分布广泛、沉积类型多样,所含生物群相当丰富,是世界上研究志留纪地层及相关动物群的重要地区之一。至今国内外学者对中国志留纪的古生物与地层已做了大量的科研工作,取得一系列重要的科研成果。对志留纪各门类化石的详细研究,丰富了生物多样性,为生物演化研究提供了重要的化石实证。如早期脊椎动物曙鱼、鬼鱼和全颌鱼的发现分别为脊椎动物颌的起源、硬骨鱼类的起源与早期演化、有颌类冠群的起源与早期分化的研究提供了关键的证据^[10-15]。近年来在中国志留系划分与对比、重要界线的确定等方面也取得了突破性进展,基本上解决了一些长期争论不休的地层学问题,如中国南方志留纪 3 套海相红层的对比与时代归属、中国西北塔里木盆地西北缘柯坪—巴楚一带发育的一套古生代红色岩系的时代归属与区域对比、中国志留系顶界的确定等^[26-28]。随着过去二三十年中国志留纪鱼类化石资料的不

断积累,这些鱼类化石在相关的地层划分与对比研究中所发挥的作用开始彰显。本文主要结合近年来鱼类化石的新发现对中国志留纪鱼类化石资料及含鱼地层的对比研究做一个全面的总结,以期为中国志留纪生物地层对比的某些新认识提供鱼类化石方面的佐证。

1 中国志留纪鱼化石及其产出地点、层位

Ting 等^[29]及杨钟健^[30]曾先后提及云南东部地区志留纪晚期地层中含有鱼类化石,很可惜这批标本均没有进行古生物学方面的详细描述和研究,而且由于战乱早已不知其下落。中国志留纪鱼化石的研究现在通常认为始于潘江对产自湖北武汉的中华棘鱼类的描述及报道^[31-32],之后随着在湖南、湖北、江西、安徽、江苏、浙江、云南、四川、重庆、贵州、新疆及陕西等省或自治区志留系中越来越多鱼类化石的发现与研究,迄今早期脊椎动物中几个重要门类如无颌类(主要为盔甲鱼类)、盾皮鱼类、棘鱼类、软骨鱼类及硬骨鱼类等在中国的志留纪地层中均有发现。这些鱼类化石具有出现时代早、原始类型多、保存完好、门类齐全、产出地点及层位多等特点。据最新统计结果,中国志留纪鱼类化石的主要产出地点或地区有 28 个,分别隶属于华南板块及塔里木板块(图 1)。

中国志留纪的无颌类化石主要为盔甲鱼类。盔甲鱼类是东亚特有种类,为与化石无颌类中骨甲鱼类、异甲鱼类并列的 3 个重要亚纲之一,一般分为 3 个主要的类群,即真盔甲鱼目、华南鱼目和多鳃鱼目,另包括汉阳鱼类等基干盔甲鱼类^[33]。泥盆纪(主要是早泥盆世)的盔甲鱼类以华南鱼目、多鳃鱼目和真盔甲鱼目大量属种的繁盛为特征,而志留纪则主要包括基干盔甲鱼类与真盔甲鱼目的一些原始属种,这些无颌类化石对于志留纪区域地层划分与对比以及探讨重要地质-古生物事件的相关性均具有十分重要的意义(图 2)。

目前已描述的中国志留纪的盔甲鱼类多为真

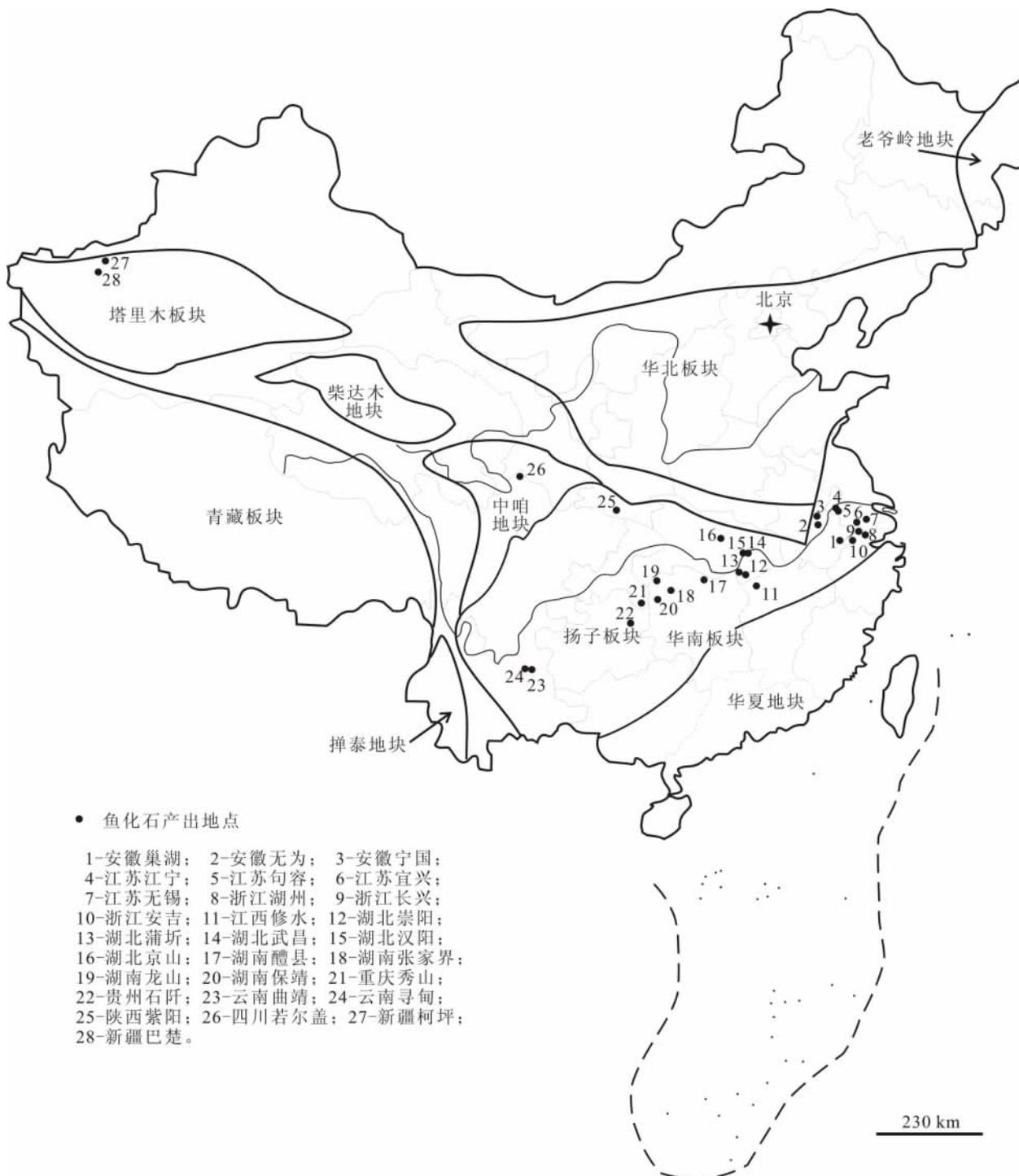


图 1 中国大地构造单元划分与志留纪脊椎动物化石的主要产地
 Fig.1 Map showing the tectonic units and distribution of Silurian vertebrate localities in China

盔甲鱼目及基干盔甲鱼类的头甲,主要产于中下扬子地区及新疆塔里木盆地西北缘柯坪、巴楚等地。前人曾描述的志留纪花鳞鱼类的鳞片化石中华花鳞鱼 *Thelodus sinensis*^[34],经重新观察可能是盾皮鱼类的外骨骼瘤点残片,也有可能是棘鱼类的鳍

刺^[25](表 1)。中国目前还没有可靠的志留纪花鳞鱼类记录。

中国志留纪的盾皮鱼类化石迄今已描述的化石属种较少,主要为胴甲鱼类(表 2)。胴甲鱼类被认为是最原始的有颌脊椎动物类群^[12,57-58]。潘

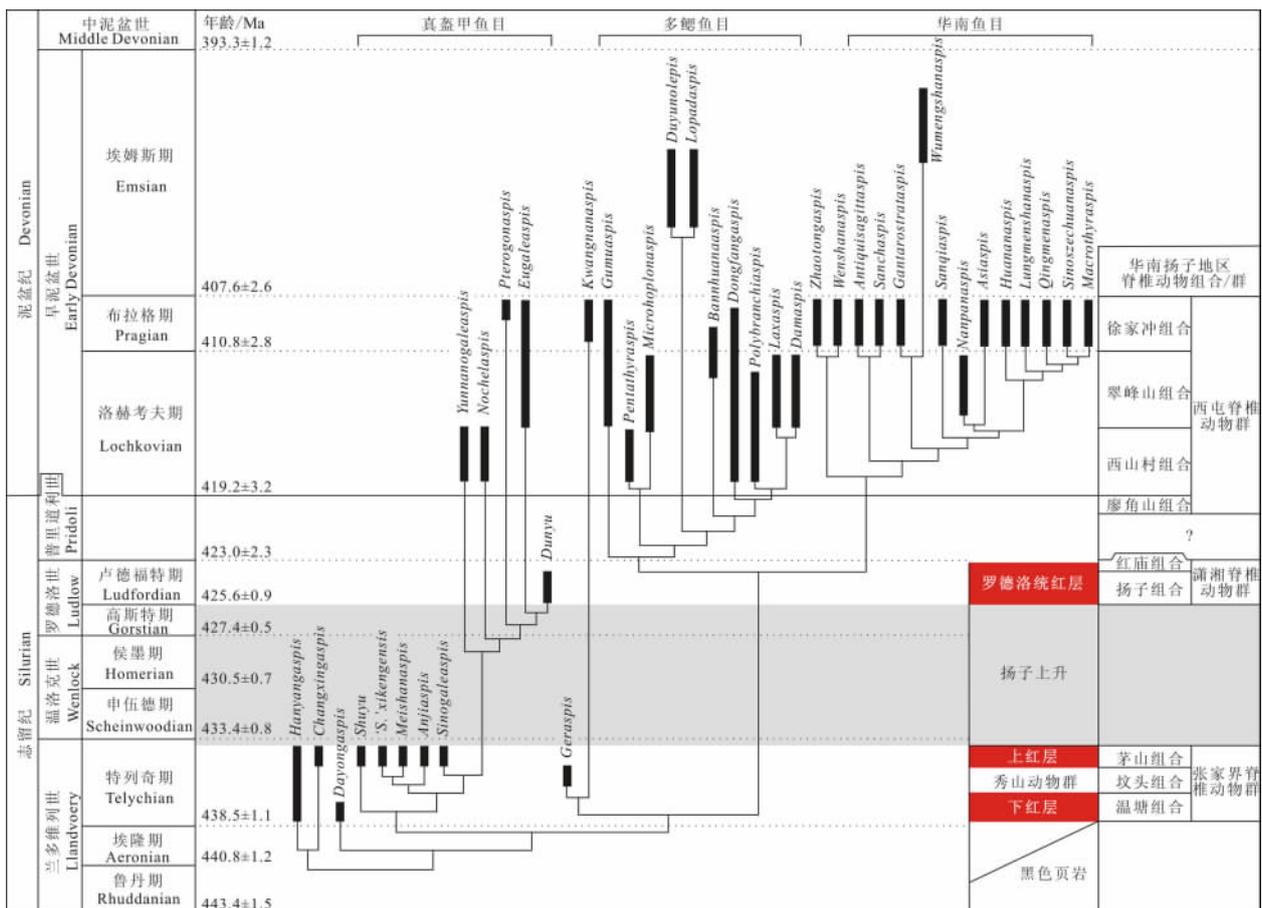


图 2 盔甲鱼类的系统发育与地史分布图
(据文献[26,33]修改补充)

Fig. 2 Phylogeny and temporal distribution of galeaspids

江报道的在湖南张家界与重庆秀山等地的小溪组、云南寻甸的岳家山组中发现的盾皮鱼“中华王氏鱼”“*Wangolepis sinensis*”^[2], 最初归属于节甲鱼类, 并一直以裸名的方式在文献中被提及^[7,59-60]。Zhu 等^[12]最近描述了云南曲靖关底组中部的初始全颌鱼 *Entelognathus primordialis*, 其系统学位置非常靠近软骨鱼类与硬骨鱼类的最近共同祖先。据最近我们对“*Wangolepis*”标本的观察, “*Wangolepis*”可能与 *Entelognathus* 有着较近的亲缘关系。

在脊椎动物的传统分类中, 有颌脊椎动物通常分为盾皮鱼纲(Placodermi)、棘鱼纲(Acanthodii)、软骨鱼纲(Chondrichthyes)和硬骨鱼纲(Osteichthyes)^[61]。近几年的系统学分析结果表明, 作为最原始的有颌脊椎动物, 盾皮鱼纲并不是一个单系类群而是并系类群^[12,57-58]。棘鱼纲的系统学位置

也是学术界长期争论的问题。最新的分析结果支持所有的棘鱼类都是软骨鱼类的干群成员, 处于软骨鱼类支系的基部^[12]。实际上, 棘鱼类与传统定义上的软骨鱼类之间的界线随着越来越多过渡类型的发现已变得模糊。不过, 为了便于与已有资料的对比, 本文仍采用传统分类中的类群划分。中国志留纪的棘鱼类化石通常以零散的鳞片等鱼类微体化石为主, 迄今已描述的化石材料也较少(表 3)。我国曾归入此类群的大化石如中华棘鱼 *Sinacanthus*、新中华棘鱼 *Neosinacanthus*, 以及塔里木棘鱼 *Tarimacanthus*, Zhu^[64]通过对它们进行古组织学研究, 认为其与软骨鱼类的鳍刺化石接近, 从而将它们置于软骨鱼类。本文采纳了 Zhu^[64]的观点。另外, 前人所记述的新亚洲棘鱼 *Neoasiacanthus*、始中华棘鱼 *Eosinacanthus* 与湖南棘鱼 *Humanacanthus* 等属^[47,65], 也应归入软骨鱼类。

表 1 中国志留纪的盔甲鱼类

Table 1 The Silurian galeaspids from China

属种	地点	层位	文献
<i>Anjiaspis reticularis</i>	浙江安吉	茅山组	[35]
<i>Changxingaspis gui</i>	浙江长兴	茅山组下部	[36]
<i>Dayongaspis hunanensis</i>	湖南张家界	溶溪组顶部	[37]
<i>Dunyu longiforus</i>	云南曲靖	关底组	[38]
<i>D. xiushanensis</i>	重庆秀山	小溪组(原迴星哨组上部)	[38-39]
<i>D. cf. D. xiushanensis</i>	湖南保靖	小溪组(原小溪峪组上部)	[2]
<i>Geraspis rara</i>	安徽无为	坟头组上部	[40]
<i>Hanyangaspis guodingshanensis</i>	湖北汉阳	坟头组(原锅顶山组)上部	[41]
	新疆巴楚	塔塔埃尔塔格组	[42]
	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组	[42]
<i>H. cf. H. guodingshanensis</i>	湖北京山	坟头组(原纱帽组)	[2,43]
<i>H. sp.</i>	新疆巴楚	依木干他乌组下部	[42]
	新疆柯坪	依木干他乌组下部	[42]
	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组上部	[44]
Hanyangaspiformes gen. et sp. indet.	陕西紫阳	吴家河组	[45]
<i>Kalpinolepis tarimensis</i>	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组上部	[42]
<i>Konoceraspis grandoculus</i>	湖南张家界	溶溪组顶部	[46]
<i>Latirostraspis chaoensis</i>	安徽巢湖	坟头组上部	[2,47]
<i>Meishanaspis lehmani</i>	浙江长兴	茅山组下部	[36,46,48]
<i>Microphymaspis pani</i>	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组上部	[49]
<i>Nanjiangaspis kalpinensis</i>	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组上部	[49]
<i>N. zhangii</i>	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组上部	[44]
<i>Platycaraspis tianshanensis</i>	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组上部	[49]
<i>Pseudoduyunaspis bachuensis</i>	新疆巴楚	依木干他乌组	[42]
<i>Shuyu zhejiangensis</i>	浙江长兴	茅山组下部	[2,11,48]
* <i>Sinogaleaspis' xikengensis</i>	江西修水	茅山组(原西坑组)下部	[48,50]
<i>Sinogaleaspis shankouensis</i>	江西修水	茅山组(原西坑组)下部	[50]
<i>Taheaspis xuuae</i>	新疆塔里木顺 2 井	塔塔埃尔塔格组中部	[51]
<i>Xiushuiaspis jiangxiensis</i>	江西修水	茅山组(原西坑组)下部	[52]
<i>X. ganbeiensis</i>	江西修水	茅山组(原西坑组)下部	[52]

表 2 中国志留纪的盾皮鱼类

Table 2 The Silurian placoderms from China

属种	地点	层位	文献
Antiarchi gen et sp. indet.	安徽巢湖	坟头组及茅山组	[53]
	江苏句容	茅山组	[54]
	江苏无锡	茅山组	[54]
	江苏宜兴	茅山组	[54]
Arthrodira gen. et sp. indet.	新疆柯坪	克兹尔塔格组上部	[42,44]
	云南曲靖	玉龙寺组底部泥灰岩	[2]
Chuchinolepidae gen. et sp. indet.	湖南澧县	秀山组上部	[55]
<i>Entelognathus primordialis</i>	云南曲靖	关底组中部	[12]
<i>Shimenolepis grani ferus</i>	湖南澧县	秀山组上部	[55]
<i>Silurolepis platydorsalis</i>	云南曲靖	关底组	[56]
"Wangolepis sinensis"(裸名)	重庆秀山	小溪组(原迴星哨组上部)	
	湖南张家界	小溪组(原小溪峪组上部)	[2,7]
	云南寻甸	岳家山组(即原关底组下部)	
Yunnanolepiformes gen. et sp. indet.	云南曲靖	关底组下部	[2]

表 3 中国志留纪的棘鱼类

Table 3 The Silurian acanthodians from China

属种	地点	层位	文献
<i>Gomphonchus sandelensis</i>	四川若尔盖	羊路沟组	[62]
<i>G. sp.</i>	云南曲靖	妙高组下部	[34]
<i>Hanilepis wangi</i>	云南曲靖	妙高组、玉龙寺组	[34]
<i>Ischnacanthidae</i> gen. indet.	四川若尔盖	羊路沟组	[62]
<i>Ischnacanthus sp.</i>	四川若尔盖	庙沟组上部	[62]
<i>Nostolepis striata</i>	云南曲靖	玉龙寺组	[34]
<i>N. sinica</i>	云南曲靖	玉龙寺组下段	[63]
<i>N. tewonensis</i>	四川若尔盖	庙沟组上部	[62]
<i>N. sp.</i>	云南曲靖	妙高组、玉龙寺组	[34]
<i>Poracanthodes qujingensis</i>	云南曲靖	妙高组上部	[34]

中国志留纪的软骨鱼类以大化石鳍棘(全球最早的软骨鱼类鳍刺化石)及微体化石鳞片为主,迄今已描述的化石材料均为鳍棘及鳞片(表4),尚未发现一件完整的标本。湖南省地质矿产局1997年提及的龙山地区辣子壳组上部的棘鱼(未定种)*Acanthodes sp.*^[70]应为软骨鱼类的鳍棘化石材料,本文中将其作为软骨鱼类一不定属种。

中国志留纪的硬骨鱼类化石材料主要发现于云南曲靖地区,迄今已描述的化石属种不多,其中还包括3个依据鳞片材料所命名的属种(表5)。王念忠等1989年描述的优美侏儒鱼*Kawalepis comptus*最初被归入到花鳞鱼类^[34],Märss等2007年基于其典型的菱形扁平的鳞片特征将其归入到辐鳍鱼类之中^[25],Zhao等2010年已采纳了此观点^[60]。

表 4 中国志留纪的软骨鱼类

Table 4 The Silurian chondrichthyans from China

属种	地点	层位	文献
<i>Chenolepis asketa</i>	贵州石阡	秀山组下部	[66]
Chondrichthyes gen. et sp. indet. (原 <i>Acanthodii</i> gen. et sp. indet.)	湖南张家界	溶溪组顶部	[67]
	江苏江宁	坟头组	[58]
	江西修水	茅山组(原西坑组)	[68]
	浙江安吉	茅山组	[69]
	浙江长兴	茅山组	[69]
Chondrichthyes gen. et sp. indet. (<i>Acanthodes sp.</i>)	浙江湖州	茅山组	[69]
	湖南龙山	辣子壳组上部	[70]
Chondrichthyes gen. et sp. indet. (cf. <i>Elegestolepis</i>)	新疆巴楚	依木干他乌组	[42]
<i>Eosinacanthus shanmenensis</i>	湖南澧县	坟头组(原纱帽组)	[65]
<i>Hunanacanthus lixianensis</i>	湖南澧县	坟头组(原纱帽组)	[65]
<i>Neosinacanthus wanzhongensis</i>	安徽巢湖	坟头组上部	[47]
<i>N. shizikouensis</i>	安徽巢湖	坟头组上部	[47]
<i>Neosinacanthus planispinatus</i>	湖北汉阳	坟头组(原锅顶山组)	[41]
	湖南张家界	溶溪组顶部	[64,67]
	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组	[64]
<i>N. sp.</i>	湖南澧县	坟头组(原纱帽组)	[65]
<i>N. sp. 1</i>	湖南张家界	溶溪组顶部	[64,67]
<i>N. sp. 2</i>	安徽巢湖	坟头组	[47,64]
	湖南张家界	溶溪组顶部	[64,67]
	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组	[64]

(续表 4)

属种	地点	层位	文献
<i>Rongolepis cosmetica</i>	贵州石阡	秀山组下部	[66]
Scale morphology A	贵州石阡	秀山组下部	[66]
Scale morphology B	贵州石阡	秀山组下部	[66]
Scale morphology C	贵州石阡	秀山组下部	[66]
<i>Shiqianolepis hollandi</i>	贵州石阡	秀山组下部	[66]
<i>Sinacanthus fancunensis</i>	安徽宁国	坟头组	[71]
	新疆巴楚	依木干他乌组	[72]
<i>S. triangulatus</i>	湖北汉阳	坟头组(原锅顶山组)	[41]
<i>S. triangulates?</i>	新疆巴楚	依木干他乌组	[72]
<i>S. wuchangensis</i>	安徽宁国	坟头组	[64,71]
	湖北汉阳	坟头组(原锅顶山组)	[73]
	湖北武昌	坟头组(原锅顶山组)上部	[31-32,64]
	湖南张家界	溶溪组顶部	[64,67]
	新疆巴楚	依木干他乌组	[72]
	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组	[74]
	浙江长兴	茅山组	[69]
<i>S. cf. S. wuchangensis</i>	湖北蒲圻、崇阳	坟头组(王冠虫层下,相当秀山组)	[75]
<i>S. sp.</i>	安徽巢湖	坟头组	[53]
	贵州石阡	秀山组下部	[66]
	湖北京山	坟头组(原纱帽组)	[2]
	湖南澧县	坟头组(原纱帽组)	[65]
	湖南张家界	溶溪组顶部	[64,67]
	新疆巴楚	依木干他乌组	[64]
	新疆柯坪	塔塔埃尔塔格组	[72]
	新疆塔里木中 12 井	塔塔埃尔塔格组中部	[51]
Spine morphology A	贵州石阡	秀山组下段	[66]
<i>Tarimacanthus bachuensis</i>	安徽宁国	坟头组	[64,71]
	湖南张家界	溶溪组顶部	[64,67]
	新疆巴楚	依木干他乌组	[64,72]
<i>Xinjiangichthys pluridentatus</i>	新疆巴楚	依木干他乌组	[76]
<i>X. tarimensis</i>	新疆巴楚	依木干他乌组	[76]
<i>X. sp.</i>	贵州石阡	秀山组下部	[66]

表 5 中国志留纪的硬骨鱼类

Table 5 The Silurian osteichthyans from China

属种	地点	层位	文献
<i>Guiyu oneiros</i>	云南曲靖	关底组中部	[10,77-78]
<i>Kawalepis comptus</i>	云南曲靖	妙高组上部	[34,60]
<i>Ligulalepis yunnanensis</i>	云南曲靖	妙高组下部	[34]
<i>Naxilepis gracilis</i>	云南曲靖	关底组、妙高组上部	[34]
Osteichthyes indet.	云南曲靖	玉龙寺组下部	[63]
<i>Psarolepis sp.</i>	云南曲靖	玉龙寺组顶部	[5]

2 中国志留纪鱼化石组合、脊椎动物群及其生存时代

基于前人对中国志留纪鱼化石及鱼化石组合的

综合研究^[2,7,79-80], Zhao 等 2010 年建立了中国志留纪的鱼类化石组合及脊椎动物群,并在此基础上,对中国志留纪含鱼地层重新做了对比研究与探讨^[60]。本文对中国志留纪鱼化石组合及脊椎动物群的组成做进一步综述,并探讨其地层时代意义。中国志留

纪的鱼类化石可识别出 11 个鱼类化石组合, 在华南 (表 6)。下面分别详细介绍华南扬子地区、西秦岭地区、塔里木西北缘地区的鱼化石组合/脊椎动物群的情况。

表 6 中国志留纪鱼化石组合及其地史分布

Table 6 The Silurian fish assemblages and their temporal distribution in China

地层系统 ^[81]		无脊椎动物化石带		脊椎动物组合/脊椎动物群											
		笔石 ^[82]	牙形类 ^[83]	华南扬子地区	西秦岭地区	塔里木西北缘									
志留纪	泥盆纪	年龄/Ma 419.2±3.2	<i>M. uniformis</i>	<i>I. woschmidti</i>	西屯动物群	西山村组合	下普通沟组合								
			<i>M. transgrediens</i>			廖角山组合	羊路沟组合								
	普里道利世	423.0±2.3	<i>M. bouceki</i>	<i>M. eosteinhorensis</i>	潇湘动物群	?	?	?							
			<i>N. branikensis</i>												
			<i>N. ultimus</i>												
			<i>M. formosus</i>						<i>O. crispa</i>	红庙组合					
			罗德洛世	卢德福特期					<i>N. koslowskii, cornuatus/podol. S. linearis</i>	<i>O. snajdri</i>	潇湘动物群	扬子组合	?	克兹尔塔格组合	
										<i>P. siluricus</i>					
										<i>A. ploeckensis</i>					
			高斯特期	425.6±0.9					<i>C. scanicus</i>	<i>K. variabilis</i>					
									<i>N. nilssoni</i>	<i>K. crassa?</i>					
			温洛克世	侯墨期					<i>C. lundensis</i>	<i>O. bohémica</i>			庙沟组合	?	
	<i>C. praedeubeli</i>														
	<i>P. parvus/G. nassa</i>														
	<i>C. lundgreni</i>	<i>O. sagitta sagitta</i>													
	申伍德期	430.5±0.7			<i>C. perneri</i>	<i>O. sagitta rhenana</i>									
					<i>C. rigidus</i>										
			<i>M. beloph</i>												
			<i>M. richarttonensis</i>	<i>P. bicornis Upper</i>											
	特列奇期	433.4±0.8	<i>C. insectus</i>	<i>P. bicornis Lower</i>		茅山组合	张家界动物群	坟头组合	依木干他乌组合						
			<i>C. lapworthi</i>	<i>P.a. amorphognathoides</i>											
			<i>M. spiralis</i>	<i>P.a. lithuanicus</i>											
			<i>M. greistoniensis</i>	<i>P.a. lennarti</i>											
			<i>M. crenulata</i>	<i>P.a. angulatus</i>											
<i>M. crispis</i>															
<i>M. turriculatus</i>			<i>P. celloni</i>												
<i>S. guerichi</i>			<i>P. eopennatus</i>												
埃隆期			438.5±1.1	<i>S. sedgwickii</i>	<i>D. cathyaensi</i>										
				<i>M. convolutus</i>											
	<i>M. argenteus</i>	<i>O. parahassi</i>													
	<i>M. triangulatus/pectinatus</i>														
鲁丹期	440.8±1.2	<i>C. cyphus</i>	<i>Ozarkocian obesa</i>												
		<i>C. vesiculosus</i>	<i>Ozarkocian aff. hassi</i>												
		<i>A. acuminatus</i>													
奥陶纪	443.4±1.5	<i>A. ascensus</i>													
		<i>Nor? perscultus</i>													

2.1 华南扬子地区

2.1.1 张家界脊椎动物群

张家界脊椎动物群系由 Zhao 等^[60]命名的小溪峪脊椎动物群演变而来。华南扬子地区的原小溪峪脊椎动物群包括 4 个鱼类化石组合——温塘组合、坟头组合、茅山组合及扬子组合, 基于真盔甲鱼类长孔盾鱼 *Dunyu longiforus*^[38] 在扬子组合之上潇湘脊椎动物群关底组合中的发现以及 Zhao 等^[60]所命名的扬子组合中秀山真盔甲鱼 *Eugaleaspis xiushanensis* 已归入盾鱼 *Dunyu* 一属^[38] 的事实, 本文中扬子组合与关底组合合并成一个鱼类化石组合, 仍用扬子组合一名, 并归入罗德洛世以鬼鱼 *Guiyu*、全颌鱼 *Entelognathus* 等为代表的潇湘脊椎动物群(详见下文), 这与最近湘西北地区小溪组及其时代重新厘定的研究成果(原小溪组或小溪峪组现一分为二——下部为迴星哨组、上部为重新厘定的小溪组^[84])相吻合。综上所述, Zhao 等^[60]命名的小溪峪脊椎动物群现仅包括温塘组合、坟头组合及茅山组合等 3 个鱼类化石组合, 其定义及鱼群组成面貌与原定义已有很大差别, 现再用小溪峪脊椎动物群一名已不妥, 考虑到这个志留纪的脊椎动物群以湘西

北张家界地区最为典型, 现将之改称为张家界脊椎动物群。该动物群主要以汉阳鱼类等基干盔甲鱼类、真盔甲鱼类、中华棘鱼类的繁盛与盾皮鱼类的出现为主要特征, 典型代表包括大庸鱼 *Dayongaspis*、中华盔甲鱼 *Sinogaleaspis*、汉阳鱼 *Hanyangaspis*、曙鱼 *Shuyu*、秀甲鱼 *Geraspis*、石门鱼 *Shimenolepis*、中华棘鱼 *Sinacanthus*、石阡鱼 *Shiqianolepis*、新疆鱼 *Xinjiangichthys* 等(图 3), 由温塘组合、坟头组合、茅山组合等 3 个鱼类化石组合组成。该动物群主要的生存时代为兰多维列世特列奇期, 延续约 5 Ma。

温塘组合系由 Zhao 等^[60]所命名, 主要以基干盔甲鱼类、中华棘鱼类的繁盛为特征, 鱼类化石材料主要产于湘西北张家界(原大庸)地区的下红层溶溪组顶部。该组合中盔甲鱼类以大庸鱼 *Dayongaspis*、锥角鱼 *Konoceraspis* 两属为代表, 中华棘鱼类以中华棘鱼 *Sinacanthus*、新中华棘鱼 *Neosinacanthus*、塔里木棘鱼 *Tarimacanthus* 3 属为代表。由于该组合缺少具有明确时代意义的鱼类化石分子, 其时代主要考虑与其共生的无脊椎动物及上覆地层等的时限来确定。牙形类的最新研究结果表明, 富含

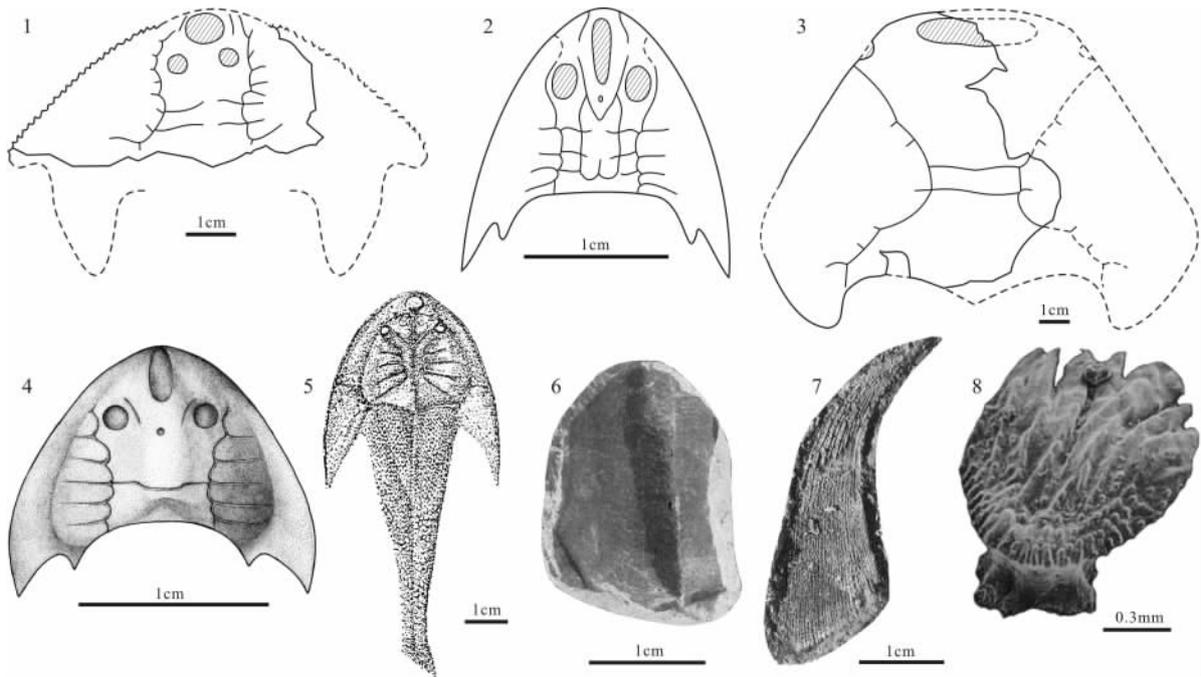


图 3 张家界脊椎动物群的一些典型代表

Fig. 3 Some representatives of Zhangjiajie Vertebrate Fauna

1—湖南大庸鱼 *Dayongaspis hunanensis* (据潘江等^[37]); 2—山口中华盔甲鱼 *Sinogaleaspis shankouensis* (据潘江等^[50]); 3—锅顶山汉阳鱼 *Hanyangaspis guodingshanensis* (据潘江等^[41]); 4—浙江曙鱼 *Shuyu zhejiangensis* (据盖志琨等^[48]); 5—珍奇秀甲鱼 *Geraspis rara* (据潘江等^[40]); 6—细纹石门鱼 *Shimenolepis grani ferus* (据王俊卿^[55]); 7—武昌中华棘鱼 *Sinacanthus wuchangensis* (据 Zhu^[64]); 8—霍氏石阡鱼 *Shiqianolepis hollandi* (据 Sansom 等^[66])。

温塘组合的溶溪组的时代很可能为兰多维列世埃隆晚期^[83];然而最近戎嘉余等^[26]认为:“牙形类等各带的延限及与笔石带的对比仍在深化之中,应该说,牙形类将溶溪组归于埃隆阶的认识,还不是最终结论,有待于新证据的获得,因为即使 *P. eopenatus* 带之底位于 *S. turriculatus* 带中部, *Ozarkodina guizhouensis* 带的归属仍存在两种可能性,即延至或不延到上埃隆阶;另按最新意见,在特列奇阶的范围内, *S. turriculatus* 带之下还有 *Spirograptus guerichi* 带,后者是志留系诸多笔石带中历程最长的一个带(2.4 Ma);有鉴于此,下特列奇阶的空间留给溶溪组的可能性目前很难排除。”Zhao 等^[60]2010 年将该鱼类化石组合的生存时代确定为特列奇早期的观点至少从目前的情况来看还是可以被接受的,本文仍将温塘组合的生存时代置于特列奇早期,并认为该组合代表了中国志留纪的第一个鱼类化石组合。

坟头组合系由 Zhao 等^[60]所命名,主要以盔甲鱼类(包括汉阳鱼类及多鳃鱼类)、软骨鱼类(包括中华棘鱼类、蒙古鱼类及石阡鱼类)的繁盛、盾皮鱼类中胴甲鱼类的出现为特征,鱼类化石材料主要产于中下扬子地区坟头组上段、上扬子地区秀山组下段以及陕南地区吴家河组顶部。该组合中盔甲鱼类以汉阳鱼 *Hanyangaspis*、秀甲鱼 *Geraspis* 两属及一些汉阳鱼类不定属种为代表,软骨鱼类以中华棘鱼 *Sinacanthus*、新中华棘鱼 *Neosinacanthus*、始中华棘鱼 *Eosinacanthus*、湖南棘鱼 *Hunanacanthus*、新亚洲棘鱼 *Neosiacanthus*、塔里木棘鱼 *Tarimacanthus*、新疆鱼 *Xinjiangichthys*、石阡鱼 *Shiqianolepis*、戎氏鱼 *Rongolepis*、陈氏鱼 *Chenolepis* 等属以及一些鳍刺、鳞片不定属种为代表,盾皮鱼类则主要以胴甲鱼类石门鱼 *Shimenolepis* 及一些曲靖鱼科不定属种为代表。软骨鱼类中的 *Xinjiangichthys* 可归入蒙古鱼科,与产自蒙古西部兰多维列世晚期的蒙古鱼 *Mongolepis* 和泰斯鱼 *Teslepis* 相近^[76],明确指示了该鱼类化石组合的生存时代为兰多维列世特列奇期;陕南地区吴家河组顶部所产的汉阳鱼类与笔石 *Cyrtograptus lapworthi* 共生^[45],吴家河组中的汉阳鱼类无疑也生活于特列奇期。Zhao 等^[60]据此并结合与之共生的笔石等无脊椎动物化石资料将其生存时代进一步确定为特列奇中期,这与戎嘉余等^[26]认为产有秀山动物群的秀山组可对比到笔石带 *M. griestoniensis* 带到 *Oktavites spiralis*-*Stomatograptus grandis* 带(特列奇阶中上部)的观点基本一致,坟头组合的生存时代无疑为兰多维列世特列奇中期。

的观点基本一致,坟头组合的生存时代无疑为兰多维列世特列奇中期。

茅山组合系由 Zhao 等^[60]所命名,主要以真盔甲鱼类、中华棘鱼类的繁盛为特征,已描述的鱼类化石材料主要产于中下扬子地区茅山组下段,即原上红层的下部层位。该组合中盔甲鱼类主要以真盔甲鱼类曙鱼 *Shuyu*、煤山鱼 *Meishanaspis*、安吉鱼 *Anjiaspis*、中华盔甲鱼 *Sinogaleaspis* 及基干盔甲鱼类长兴鱼 *Changxingaspis*、修水鱼 *Xiushuiaspis* 等属为代表,软骨鱼类以中华棘鱼 *Sinacanthus* 一属以及一些鳍刺不定属种为代表,盾皮鱼类则主要以一些不定属种为代表。该组合与潘江^[2]所命名的 *Sinogaleaspis*-*Xiushuiaspis* 组合及 Zhu 等^[7]所命名的志留纪脊椎动物组合 3 即 *Sinogaleaspis*-*Xiushuiaspis*-*Sinacanthus* 组合基本一致。耿良玉等^[85]曾认为茅山组为志留纪的第五红层,其地质时代为普里道利世末期,不能与迴星哨组对比。近年来我们在湘西北张家界地区志留系的野外考察中,在上红层迴星哨组中也发现了大量的鱼类化石,尽管没有盔甲鱼类化石材料,但盾皮鱼类及软骨鱼类鳍刺等材料与茅山组下段中的鱼类非常相似,支持了赵文金^[18]、王怿等^[84]茅山组可与迴星哨组直接对比的观点。该组合中的中华棘鱼类鳍刺是一类我国所特有的软骨鱼类,化石属种虽少,但其层位相当稳定,仅限于志留纪早期的海相地层^[19,65],因此含有此类化石材料的茅山组合最晚也不会晚于特列奇末期,另结合与该鱼类化石组合共生的无脊椎动物化石及其与上下地层的关系,其生存时代为特列奇晚期^[60],尚未到特列奇末期^[83-84]。

2.1.2 潇湘脊椎动物群

潇湘脊椎动物群由 Zhao 等^[60]所命名,主要以盾皮鱼类与棘鱼类的繁盛、硬骨鱼类的出现与分化为主要特征,典型代表包括盾鱼 *Dunyu*、志留鱼 *Silurolepis*、“王氏鱼”“*Wangolepis*”、全颌鱼 *Entelognathus*、背棘鱼 *Nostolepis*、棒棘鱼 *Gomphonchus*、孔棘鱼 *Poracanthodes*、纳西鱼 *Naxilepis*、舌鳞鱼 *Ligulalepis*、鬼鱼 *Guiyu* 等(图 4),主要由扬子组合及红庙组合 2 个鱼类化石组合组成,该脊椎动物群以罗德洛统红层中的鱼类化石组合——扬子组合最具代表性,其主要的生存时代为罗德洛世晚期,延续约 2.6 Ma。

扬子组合系由 Zhao 等^[52]所命名,当时主要是

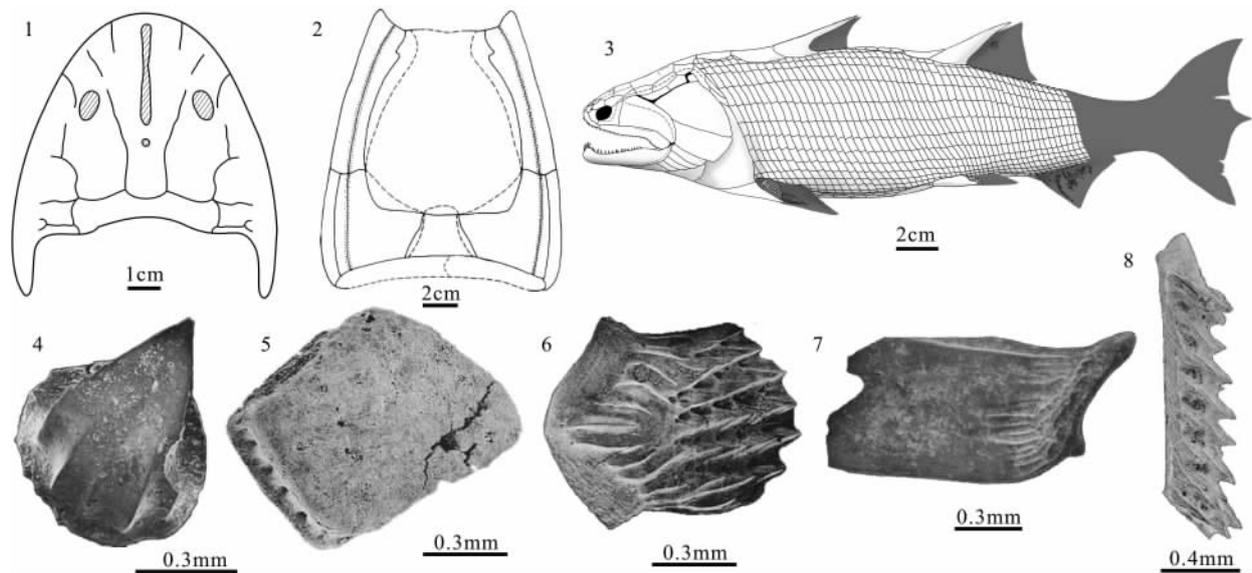


图4 潇湘脊椎动物群的一些典型代表

Fig. 4 Some representatives of Xiaoxiang Vertebrate Fauna

1—长孔盾鱼 *Dunyu longiforus* (据朱敏等^[38]); 2—阔背志留鱼 *Silurolepis platydorsalis* (据 Zhang 等^[56]); 3—梦幻鬼鱼 *Guiyu oneiros* (据 Zhu 等^[77]); 4—条纹背棘鱼 *Nostolepis striata* (据王念忠等^[34]); 5—棒棘鱼 (未定种) *Gomphonchus* sp. (据王念忠等^[34]); 6—曲靖孔棘鱼 *Poracanthodes qujingensis* (据王念忠等^[34]); 7—秀丽纳西鱼 *Naxilepis gracilis* (据王念忠等^[34]); 8—云南舌鳞鱼 *Ligulalepis yunnanensis* (据王念忠等^[34])。

指以盾皮鱼类“*Wangolepis*”与真盔甲鱼类盾鱼 *Dunyu* 的出现和繁盛为特征,随着近年来在关底组中部地层中“*Wangolepis*”及 *Dunyu* 等化石材料的发现,显然由 Zhao 等^[60]所命名的、原赋存于关底组中部地层中的鱼类化石组合——关底组合与扬子组合具有相似的鱼群组成面貌,本文中将其合并成一个鱼类化石组合,仍用扬子组合一名,但其含义已发生明显的变化。本文中重新厘定后的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,鱼类化石材料主要产于湖南张家界与保靖、重庆秀山等地现已重新厘定的小溪组以及云南东部寻甸与曲靖地区的岳家山组、关底组(中部)之中。该组合中硬骨鱼类以鬼鱼 *Guiyu* 一属为代表,真盔甲鱼类以 *Dunyu* 一属为代表(由朱敏等 2012 年所命名,同时基于对秀山真盔甲鱼 *Eugaleaspis xiushanensis* 头甲标本的重新观察,也将其归入该属^[38]),盾皮鱼类以全颌鱼 *Entelognathus*、目前尚未描述发表的“*Wangolepis*”以及个体较小的云南鱼类未定属种为代表。鱼类化石通常被认为是志留纪化石稀少的海相红层对比的主要证据^[83],由于均含有盾皮鱼类“*Wangolepis*”与真盔甲鱼类 *Dunyu*,现已重新厘定的小溪组无疑应可以与

岳家山组+关底组(中下部)直接对比。近年来,王恽等^[84,86]主要基于湖南张家界、重庆秀山等地小溪组中微体植物碎片的研究,认为这套富含大型虫管遗迹化石的地层时代为罗德洛世晚期—普里道利世早期;鱼类化石组合——扬子组合中的鱼类代表分子之一 *Guiyu* 确定产于罗德洛世晚期牙形类 *O. crista* 化石带之下的关底组中部的地层中^[10],因此该鱼类化石组合的上限最晚只能到罗德洛世卢德福特中期。基于此,本文认为该鱼类化石组合——扬子组合的生存时代最有可能为罗德洛世卢德福特早—中期。

红庙组合系由 Zhao 等^[60]于 2010 年依据鱼类微体化石所命名,主要以硬骨鱼类、棘鱼类、盾皮鱼类的繁盛为特征,鱼类化石材料主要产于云南东部曲靖地区的关底组上部、妙高组及玉龙寺组下段。该组合中硬骨鱼类以产自关底组上段中的纳西鱼 *Naxilepis* 一属、妙高组中的舌鳞鱼 *Ligulalepis*、侏儒鱼 *Kawalepis*、*Naxilepis* 3 属、玉龙寺组下段中的一硬骨鱼类不定属种等为代表^[25,34,63],近年来在关底组上部也发现一些斑鳞鱼类的骨片;棘鱼类主要以产自妙高组的孔棘鱼 *Poracanthodes*、哈尼鱼 *Hanilepis*、背棘鱼 *Nostolepis*、棒棘鱼 *Gomphon-*

chus 4 属和产自上易剥页岩之下的玉龙寺组之中的 *Nostolepis*、*Hanilepis* 两属的一些属种为代表^[34,63]; 盾皮鱼类以产自关底组上部的志留鱼 *Silurolepis* 一属及玉龙寺组底部泥灰岩中的节甲鱼类不定属种为代表^[2,56]。斑鳞鱼类骨片的发现,说明该鱼类化石组合与其下的扬子组合、其上的廖角山组合均具有一定的继承性。该组合中的棘鱼类 *Nostolepis* 是一类广泛分布于欧洲、北美、大洋洲及亚洲的栅棘鱼类,而 *Poracanthodes* 与 *Gomphonchus* 则是欧洲波罗的海周边地区常见的铗棘鱼类,它们的时限均主要限于罗德洛世—早泥盆世,近年来国外同行对棘鱼类的研究表明:立陶宛及拉脱维亚等地罗德洛世卢德福特晚期棘鱼类 *Nostolepis gracilis* 化石带中通常也见有在中国南方发现的 3 个棘鱼类属的分子^[23];该鱼类化石组合所赋存的地层包括关底组上部、妙高组及玉龙寺组上易剥页岩之下的所有碎屑岩及碳酸盐岩沉积,牙形类化石的研究结果表明这些海相沉积地层只限于牙形类 *O. crispa* 化石带^[87]。综上所述,该鱼类化石组合的生存时代应与牙形类 *O. crispa* 化石带一致,为罗德洛世卢德福特晚期^[60]。

2.1.3 西屯脊椎动物群

西屯脊椎动物群由 Zhao 等^[60] 所命名,主要以盔甲鱼类中的多鳃鱼类及华南鱼类、盾皮鱼类中的云南鱼类、硬骨鱼类中的肉鳍鱼类冠群的辐射演化为特征,在华南扬子地区主要由廖角山组合、西山村组合、翠峰山组合及徐家冲组合等 4 个鱼类化石组合组成,该脊椎动物群主要的生存时代为普里道利世最晚期—早泥盆世布拉格期,延续约 12 Ma,其中的西山村组合、翠峰山组合及徐家冲组合均为早泥盆世的鱼类化石组合,本文不做详细介绍,而廖角山组合是该脊椎动物群中唯一一个生存于志留纪晚期的鱼类化石组合。

廖角山组合系由 Zhao 等^[60] 所命名,主要以硬骨鱼类、棘鱼类的繁盛为特征,鱼类化石材料主要产于云南东部曲靖地区的玉龙寺组顶部上易剥页岩之中。该组合中硬骨鱼类以斑鳞鱼 *Psarolepis* 一属为代表。基于前人的一些生物地层学研究结果,主要依据在上易剥页岩顶部层位中发现的相当于牙形类 *M. eosteinhornensis* 化石带的牙形类 *Ozarkodina excavate*、*Dentacodina* sp. 及 cf. *Ligonodina elegans detorta* 等分子,并结合上下地层的时代,将该鱼类化石组合的生存时代归入普里道

利世^[28,60,88-89]。

2.2 西秦岭地区

庙沟组合系由 Zhao 等 2010 年所命名^[60],主要以棘鱼类的繁盛为特征,鱼类化石材料主要产于西秦岭地区的庙沟组中,以背棘鱼 *Nostolepis* 和铗棘鱼 *Ischnacanthus* 两属为代表。前已述及,*Nostolepis* 是一个全球广布的栅棘鱼类属,在罗德洛世—早泥盆世最为常见,但在立陶宛东部地区其下限可延至温洛克世^[23];王念忠等^[62] 于 1998 年曾提及依据该组合之下所产的笔石及腕足类化石将庙沟组中含鱼化石的地层时代确定为温洛克世晚期。因此在目前情况下,该鱼类化石组合暂归入温洛克世侯墨期,但不排除归入罗德洛世的可能。

羊路沟组合系由 Zhao 等^[60] 所命名,主要以棘鱼类的繁盛为特征,鱼类化石材料主要产于西秦岭四川若尔盖地区的羊路沟组上部,以铗棘鱼类桑德林棒棘鱼 *Gomphonchus sandelensis* 和铗棘鱼类—不定属种 *Ischnacanthidae* gen. & sp. indet. 为代表^[62]。该组合中的 *G. sandelensis* 在欧洲拉脱维亚地区最早仅见于普里道利世的地层中^[90],因此该鱼类化石组合的时代可归入普里道利世,这得到了最近在西秦岭地区所取得的化学地层学研究结果的支持^[91]。

2.3 塔里木西北缘

塔塔埃尔塔格组合系由 Zhao 等^[60] 所命名,主要以盔甲鱼类(包括大庸鱼类及汉阳鱼类)、软骨鱼类中的中华棘鱼类的繁盛为特征,鱼类化石材料主要产于新疆柯坪、巴楚地区的塔塔埃尔塔格组上段。该组合中无颌类以柯坪鱼 *Kalpinolepis*、宽头鱼 *Platycaraspis*、小瘤鱼 *Microphymaspis*、南疆鱼 *Nanjiangaspis*、汉阳鱼 *Hanyangaspis* 5 属为代表,中华棘鱼类以中华棘鱼 *Sinacanthus*、新中华棘鱼 *Neosinacanthus* 两属为代表,鱼群组成面貌与温塘组合基本相同:都以盔甲鱼大庸鱼类及软骨鱼中华棘鱼类的繁盛为特征。该组合中的盔甲鱼类 *Platycaraspis* 与温塘组合中的大庸鱼 *Dayongaspis* 的头甲都呈宽大的三角形,并且角发育、眶孔大、位置靠中、头甲侧缘后部具小刺,均隶属于大庸鱼科。另这两个鱼类化石组合中的中华棘鱼类都含有 *Sinacanthus* 及 *Neosinacanthus*。这些均指示了这两个鱼类化石组合具有很好的可比性,其生存时代也应一致,为兰多维列世特列奇早期^[27]。

依木干他乌组合系由 Zhao 等^[60] 所命名,主要

以盔甲鱼类(包括汉阳鱼类及多鳃鱼类)、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,鱼类化石材料主要产于新疆巴楚、柯坪地区的依木干他乌组。该组合中盔甲鱼类以汉阳鱼 *Hanyangaspis*、假都匀鱼 *Pseudoduyunaspis* 两属为代表,软骨鱼类以中华棘鱼 *Sinacanthus*、塔里木棘鱼 *Tarimacanthus*、新疆鱼 *Xinjiangichthys* 三属及一不定属种为代表,其中的一不定属种系指王俊卿等^[42]于1996年命名的 *cf. Elegestolepis*,赵文金等^[27]认为其更像石阡鱼 *Shiqianolepis*,还需深入研究。该鱼类化石组合的鱼群组成面貌与坟头组合基本上完全相同:都以汉阳鱼类与多鳃鱼类等盔甲鱼类以及中华棘鱼类、蒙古鱼类与石阡鱼类等软骨鱼类的繁盛为特征,明确指示了这两个鱼类化石组合具有很好的可比性,其生存时代应一致,为兰多维列世特列奇中期^[27,60]。

克兹尔塔格组合系由 Zhao 等^[60]所命名,主要以盾皮鱼类中的节甲鱼类的出现或繁盛为特征,鱼类化石材料主要产于新疆柯坪地区的克兹尔塔格组上段下部,目前仅提及并描述报道了一长胸节甲鱼类的躯甲骨片——前腹侧片+棘片^[44,49,92]。该组合目前鱼类化石材料发现得较少可能主要与工作力度不强有关。长胸节甲鱼类化石在国外多发现于罗德洛世、普里道利世和早泥盆世^[49],我们近年来的野外工作则表明,此类具有棘片的盾皮鱼类化石在滇东岳家山组(原关底组下部)、湘西北地区现已重新厘定的小溪组内均有发现^[27],含有克兹尔塔格鱼类化石组合的克兹尔塔格组上段下部的地层应与岳家山组+关底组(中下部)、现重新厘定的小溪组层位相当,克兹尔塔格组合的地质时代最有可能为罗德洛世卢德福特早—中期。

3 中国志留纪含鱼地层对比研究

中国志留纪的含鱼地层就目前所知主要分布于华南板块的扬子、西秦岭地区以及塔里木板块的西北缘地区,均为浅水海相地层,岩相类型多样,并通常缺少志留纪无脊椎动物标准化石笔石的资料,地层划分对比历来存在争议,其中志留纪几套海相红层的对比与时代归属、重要地质界线如志留系-泥盆系界线的精确确定等问题尚有诸多疑义,这不仅制约了对早期脊椎动物演化的深入

探讨,而且影响了我国志留纪高精度地层框架的建立。

中国志留纪的鱼化石既有地方性特别强的属种(如盔甲鱼类),又有全球广布的一些类型(如软骨鱼类、棘鱼类),在不同的地质年代形成各具特点的鱼化石组合及脊椎动物群,因此有关化石研究在志留系区域地层对比研究中起到越来越重要的作用。

由于缺少特征化石,华南扬子区志留系红层的时代与对比一直令人困惑^[83]。以往只区分出两套红层:下红层(以溶溪组代表)与上红层(以迴星哨组为代表),归属到特列奇阶。1998年,王成源^[93]依据牙形类的研究,提出上红层可再区分出两个层位,下部仍为迴星哨组的红层,属特列奇阶,而上部为关底组的红层,属罗德洛世晚期。1999年,耿良玉等^[85]依据胞石(几丁石)的研究,将华南红层区分出5层,“一红层”和“二红层”分别与前人的下红层、上红层相当,“三红层”和“四红层”则分别与关底组的底部和上部层位相当,而“五红层”主要与茅山组层位相当。王成源^[83]在2011年主要依据近年来牙形类化石的研究,再次确认了扬子区志留系3套红层的存在及其时代。最近戎嘉余等^[26]详细剖析了上扬子区的志留系下红层,并明确指出上扬子区志留系的浅水红层主要有3套:第一套为兰多维列统特列奇阶下部即下红层(如溶溪组),第二套为特列奇阶中上部即上红层(如迴星哨组),第三套为罗德洛统上部罗德洛统红层(如包括岳家山组在内的“关底组”)。

近年来我们在扬子区志留系中开展了一些野外考察工作,所发现的古鱼类化石资料支持了我国华南扬子区的志留系存在3套主要的浅水海相红层的认识。前已述及,该区含有2个主要的脊椎动物群和6个鱼类化石组合——温塘组合、坟头组合、茅山组合、扬子组合、红庙组合、廖角山组合;其中温塘组合、茅山组合、扬子组合分别赋存于该区的3套浅海相红层当中,坟头组合的地层层位则与无脊椎动物群——秀山动物群一样,夹于下红层与上红层之间,而红庙组合与廖角山组合的层位则位于罗德洛统红层之上。基于脊椎动物群及鱼类化石组合的研究,华南扬子区志留纪含鱼化石地层的对比框架可以建立起来,据此中国志留纪所有含鱼化石的地层都可以进行较可靠的对比(表7)。

表 7 中国志留纪含鱼化石地层对比表

Table 7 The correlation of Silurian fish-bearing strata in China

地层系统 ^[81]		笔石化石带 ^[82]	牙形类化石带 ^[83]	华南扬子地区脊椎动物组合	湖南张家界	重庆秀山	贵州石阡	湖北汉阳	江西修水	安徽巢湖	浙江长兴	江苏南京	新疆塔里木	西秦岭	陕西南	云南曲靖	红层			
志留纪	普里道利世	419.2±3.2	<i>M. transgrediens</i>	西电动物群	廖角山组合															
			<i>M. bouceki</i>	<i>M. eosteinhorensis</i>	?															
			<i>N. branikensis</i>																	
			<i>N. ultimus</i>																	
	罗德福特期	423.0±2.3	<i>M. formosus</i>	<i>O. crispa</i>	红庙组合															
			<i>N. kostowskii</i> , <i>cornuatus/podol</i>	<i>O. snajdri</i>	潇湘动物群	扬子组合	小溪组	小溪组												
	高斯特期	425.6±0.9	<i>S. linearis</i>	<i>P. siluricus</i>																
			<i>A. ploeckensis</i>																	
	侯墨期	427.4±0.5	<i>C. scanicus</i>	<i>K. variabilis</i>																
			<i>N. nilssoni</i>	<i>K. crassa?</i>																
			<i>C. lundensis</i>																	
			<i>C. praedeubelyi</i>	<i>O. bohemia</i>																
	温洛克世	申伍德期	430.5±0.7	<i>C. lundgreni</i>	<i>O. sagitta sagitta</i>															
				<i>C. perneri</i>	<i>O. sagitta rhenana</i>															
	兰多维列世	特列奇期	433.4±0.8	<i>C. rigidus</i>	<i>M. beloph</i>															
				<i>M. richartoniensis</i>	<i>P. bicornis Upper</i>															
				<i>C. centrifugus</i>	<i>P. bicornis Lower</i>															
				<i>C. insectus</i>	<i>P. bicornis Lower</i>															
		<i>C. lapworthi</i>	<i>P. a. amorphognathoides</i>																	
		<i>M. spiralis</i>	<i>P. a. lithuanicus</i>																	
	<i>M. greistoniensis</i>	<i>P. a. lennarti</i>																		
	<i>M. crenulata</i>	<i>P. a. angulatus</i>																		
	<i>M. turriculatus</i>	<i>P. celloni</i>																		
	<i>S. guerichi</i>	<i>P. eopennatus</i>																		
埃隆期	438.5±1.1	<i>S. sedgwickii</i>	<i>D. cathyaensi</i>																	
		<i>M. convolutus</i>	<i>O. parahassi</i>																	

对于华南扬子地区的第一套红层,戎嘉余等^[26]曾就其地理分布、时代讨论及沉积环境等方面做过详细的分析与讨论,认为其时代最有可能归属于兰多维列世特列奇早期,而王成源^[83]依据牙形类生物地层的分析认为下红层(溶溪组)的时代可能为埃隆期晚期的观点还有待于新证据的获得。湖南张家界地区溶溪组近顶部地层中的鱼类化石组合——温塘组合指示了下红层上部的时代为特列奇早期,但溶溪组中下部一大套地层是否全部归为特列奇早期或部分可下延到埃隆期,目前的鱼类化石资料尚不能给出一个明确的答案。扬子地区下红层底界的确定取决于该地区特列奇阶与埃隆阶界线的确定,但在以介壳相为主的细碎屑岩沉积区,确定特列奇阶的底界一直是一个大难题^[94]。鉴于上述情况,本文中扬子地区下红层的时代暂采纳戎嘉余等^[26]的观点。对于第二套红层,从鱼类化石资料来看,在茅山组与迴星哨组之中都含有相同或相近的中华棘鱼类鳍刺等材料,应为同一鱼类化石组合,即本文中前已详细述及的茅山组合。茅山组与迴星哨组可进行直接对

比,其地质时代为兰多维列世特列奇晚期,而非耿良玉等^[85]曾认为的普里道利世末期。对于第三套红层,由于近年来一系列硬骨鱼类基干类群、真盔甲鱼类、盾皮鱼类和棘鱼类化石材料的发现而形成了一个非常重要的鱼类化石组合——即重新厘定的扬子组合,其中的“*Wangolepis*”与 *Dunyu* 为其所赋存的地层(如小溪组以及岳家山组、关底组中部等)进行直接对比提供了可靠的证据,这套海相红层的地质时代正如扬子组合的生存时代一样,为罗德洛世卢德福特早—中期。

同样由于缺少特征化石,对新疆塔里木盆地西北缘柯坪—巴楚一带发育的一套古生代红色岩系(包括塔塔埃尔塔格组、依木干他乌组和克兹尔塔格组)的划分与对比,长期以来争论不断^[27]。由于这套古生代红色岩系是塔里木盆地油气的—个主要富集层段,对该套岩系的地层划分与对比的精细研究,将能够为进一步的油气勘探与开发提供重要的科学依据。近年来,我们主要依据这套古生代红色岩系中丰富的鱼类化石资料,重新厘定了这套红色岩系

中各组的定义,并由老到新建立了塔塔埃尔塔格组合、依木干他乌组合与克兹尔塔格组合 3 个鱼类化石组合,其鱼群组成面貌分别与华南扬子区的温塘组合、茅山组合及扬子组合的一致或相似、相近,指示该套红色岩系与华南扬子区志留纪的海相红层可直接对比^[27,60](表 7)。当然,由于在克兹尔塔格组中发现的化石材料很有限(这与工作开展较少有关),该组除了罗德洛世卢德福特早—中期的沉积以外,是否还包括其上的普里道利世、其下的罗德洛世早期及温洛克世的沉积还有待进一步的研究工作的开展。

中国志留系顶界——即志留系-泥盆系界线问题长期以来悬而未决。华南的志留系及泥盆系相当发育,在不同相区均有保存完好的连续沉积剖面,并具有古生物化石丰富、演化早、分异快、保存好、数量多等特点^[19,95-97],与欧美传统地区的地层相比,具有得天独厚的优越地质条件,一些剖面目前已基本上具备了作为志留系-泥盆系界线区域参考剖面的条件,并早已成为华南乃至东亚地区开展志留系—泥盆系界线附近地层学研究的重要剖面,如云南曲靖西山村剖面、四川若尔盖普通沟剖面及广西玉林长湾塘剖面。然而前人近 40 年的研究清楚地表明:在华南前已提及的、保存完好的 3 个剖面中,尽管普里道利统与下泥盆统均为连续沉积,层序清楚,各门类化石丰富,但在西山村剖面中未见到笔石 *Monograptus uniformis* 与牙形类 *Icriodus worschmidti worschmidti*,而三叶虫也只是见到 *Wurmburgella rugulosa sinensis* 并未发现 *W. rugulosa rugulosa*^[98],在普通沟剖面中未见到 *M. uniformis* 与 *W. rugulosa rugulosa*^[99],在长湾塘剖面中未见到 *W. rugulosa rugulosa* 与 *I. worschmidti worschmidti*、也无真正的 *M. uniformis*,而是 *M. cf. uniformis*, *M. aequabilis* 等^[100-101];在华南可能不存在 *M. uniformis*, *W. rugulosa rugulosa* 与 *I. worschmidti worschmidti* 3 种化石共同存在于一条剖面的产地。上述事实,导致华南各剖面中志留系-泥盆系界线一直争论不休,各家观点差别很大,至今未能取得一致意见。因此在华南如何精确确定不同相区志留系-泥盆系界线、如何与界线层型对比已成为我国地层古生物学工作者必须解决的一道难题。

近年来,我们主要根据脊椎动物微体化石并辅以化学地层学手段,分别在云南东部地区的曲靖西山村剖面及宜良大河剖面、四川若尔盖普通沟剖面及广西玉林长湾塘剖面开展了志留系-泥盆系界线

的研究工作,在众多前人研究工作的基础上,已在华南不同相区志留系-泥盆系界线的研究中初步取得可与“金钉子”对比的成果^[28,91,102-103],为华南志留系-泥盆系界线以及界线附近海相与非海相地层的全球对比、高精度年代地层框架的完善或建立提供了新的资料。云南东部地区的志留系-泥盆系界线位于鱼类化石组合廖角山组合与西山村组合(相当于鱼类微体化石组合玉龙寺组合与西山村组合)之间,在玉龙寺组与西山村组两组之间的界线附近^[28];西秦岭地区的志留系-泥盆系界线位于两个完全不同的鱼类微体化石组合——羊路沟组合和下普通沟组合之间,在下普通沟组下部^[28,91,102];广西玉林长湾塘剖面的志留系—泥盆系界线附近至今尚未发现鱼类微体化石,但依据笔石 *M. uniformis* 的发现及地球化学变化曲线与捷克 Klonk 剖面的对比,该剖面的志留系-泥盆系界线位于防城组的顶部^[103]。

4 结语

自国际地质对比计划(IGCP)“328”项目实施以来,鱼类化石在志留纪、泥盆纪地层划分对比研究中所起到的重要作用开始被密切关注。志留纪、泥盆纪的鱼类化石丰富,由其鳞片、牙齿、齿旋及头胸甲镶嵌片等微小部分构成的鱼类微体化石与鱼类大化石相比往往具有化石小(易于从岩屑中找到完整的化石)、数量大(适合开展组合序列研究)、演替快(可比性强)等优点,而与其他门类的微体化石相比则具有在地层中分布广(不同相区均有发现)、门类多、全球广布性等优势。近 20 年来通过加强与鱼类大化石的互补研究,目前已基本上弄清了鱼类微体化石与各鱼类类群的系统关系;它们常与其他门类化石共生,含鱼化石的地层时代可以得到很好的佐证。对志留纪、泥盆纪的鱼类化石尤其是鱼类微体化石开展深入研究之后完全可以建立起能够进行全球对比的、连续的化石组合乃至化石带,在志留纪、泥盆纪地层划分与对比的研究中起到其他门类生物化石不可替代的作用,并将十分有助于解决缺少无脊椎动物标准化石的志留纪—泥盆纪地层的精细划分与对比、海相与非海相地层的精确对比等重要的地层学问题。

在中国志留纪的地层中,近数十年来已发现了众多的早期脊椎动物化石材料,在此基础上现已建

立了志留纪不同时期面貌迥异的鱼类化石组合及脊椎动物群, 为中国志留纪 3 套海相红层的对比与时代归属、志留系顶界的确定等重要的地层学问题的解决提供了可靠的古鱼类学证据。然而由于在鱼类微体化石的研究方面, 我们的研究工作开展得较晚, 从目前来看, 还没有能够建立起中国志留纪连续的鱼类微体化石组合序列或鱼类微体化石带, 与世界上已建立了可与笔石、牙形类化石带直接对比的鱼类微体化石带的地区如欧洲波罗的海地区相比, 我们还有很多的工作要去开展和完成。近年来, 我们在研究鱼类大化石的同时, 也开展了一些与志留纪鱼类微体化石精细研究有关的工作, 如已完成曲靖地区志留系剖面的考察与测量、鱼类微体化石样品的系统采集与室内处理等基础工作。相信随着我们在志留纪鱼类微体化石研究方面投入力度的不断加强, 在不久的将来, 我们也能建立起中国志留纪较连续的鱼类微体化石带, 并将为中国志留纪地层的精确划分与对比提供重要的古鱼类学依据。

参考文献

- [1] Gross W. Fragliche actinopterygier-schuppen aus dem Silur Gotlands[J]. Lethaia, 1968, 1: 184-218.
- [2] 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.
- [3] Janvier P. Early Vertebrates[M]. Oxford: Clarendon Press, 1996: 1-393.
- [4] Karatajūte-Talimaa V N, Noviskaya L I. *Sodolepis*, a new representative of Mongolepidida (Chondrichthyes ?) from the Lower Silurian of Mongolia[J]. Paleontologicheskii Zhurnal, 1997, 5: 96-103.
- [5] Zhu M, Schultze H P. The oldest sarcopterygian fish[J]. Lethaia, 1997, 30(4): 293-304.
- [6] Burrow C J, Young G C. An articulated teleostome fish from the Late Silurian (Ludlow) of Victoria, Australia[J]. Records of the Western Australian Museum, 1999, 57(Suppl): 1-14.
- [7] Zhu M, Wang J Q. Silurian vertebrate assemblages of China [J]. Courier Forschungs-Institut Senckenberg, 2000, 223: 161-168.
- [8] Märss T, Miller C G. Thelodonts and distribution of associated conodonts from the Llandovery-lowermost Lochkovian of the Welsh Borderland[J]. Palaeontology, 2004, 47(5): 1211-1265.
- [9] Botella H, Blom H, Dorka M, et al. Jaws and teeth of the earliest bony fishes[J]. Nature, 2007, 448: 583-586.
- [10] Zhu M, Zhao W J, Jia L T, et al. The oldest articulated osteichthyan reveals mosaic gnathostome characters[J]. Nature, 2009, 458: 469-474.
- [11] Gai Z K, Donoghue P C J, Zhu M, et al. Fossil jawless fish from China foreshadows early jawed vertebrate anatomy[J]. Nature, 2011, 476: 324-327.
- [12] Zhu M, Yu X B, Ahlberg P E, et al. A Silurian placoderm with osteichthyan-like marginal jaw bones [J]. Nature, 2013, 502: 188-193.
- [13] Oisi Y, Ota K G, Kuraku S, et al. Craniofacial development of hagfishes and the evolution of vertebrates[J]. Nature, 2013, 493(7431): 175-180.
- [14] Friedman M, Brazeau M D. A jaw-dropping fossil fish[J]. Nature, 2013, 502(7470): 175-177.
- [15] Coates M I. Beyond the age of fishes[J]. Nature, 2009, 458(7237): 413-414.
- [16] John L. Palaeozoic Vertebrate Biostratigraphy and Biogeography[M]. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1994: 1-369.
- [17] Wang N Z. Silurian and Devonian jawless craniates (Galeaspida, Thelodonti) and their habitats in China[J]. Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 4^e série section C, 1995, 17: 57-84.
- [18] 赵文金. 中国古生代中期盔甲鱼类及其古地理意义[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 305-320.
- [19] Zhao W J, Zhu M. Diversification and faunal shift of Siluro-Devonian vertebrates of China[J]. Geological Journal, 2007, 42(3/4): 351-369.
- [20] Blicke A, Mark-Kurik E, Märss T. Biostratigraphical correlations between Siluro-Devonian invertebrate-dominated and vertebrate-dominated sequences: The east baltic example[J]. Canadian Society of Petroleum Geologists (Memoir 14), 1988, 2(3): 579-587.
- [21] Blicke A, Turner S. Palaeozoic vertebrate biochronology and global marine/non-marine correlation; Final report of the IGCP328 (1991 - 1996) [J]. Courier Forschung-Institut Senckenberg, 2000, 223: 1-575.
- [22] 王念忠. 中国古生代鱼类微体化石研究二十年[J]. 地层学杂志, 2006, 30(1): 1-10.
- [23] Valiukevičius J. Silurian acanthodian biostratigraphy of Lithuania[J]. Geodiversitas, 2005, 27(3): 349-380.
- [24] Valiukevičius J. Event pattern in the development of Siluro-Devonian acanthodians of Lithuania[J]. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Monatshefte, 2006, 6: 321-343.
- [25] Märss T, Turner S, Karatajūte-Talimaa V N. Handbook of Palaeoichthyology: Volume 1B: "Agnatha" II. Thelodonti [M]. München: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2007: 1-143.
- [26] 戎嘉余, 王怿, 张小乐. 追踪地质时期的浅海红层: 以上扬子区志留系下红层为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 862-878.
- [27] 赵文金, 王士涛, 王俊卿, 等. 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[J]. 地层学杂志, 2009, 33

- (3): 225-240.
- [28] Zhao W J, Wang N Z, Zhu M, et al. Geochemical stratigraphy and microvertebrate assemblage sequences across the Silurian/Devonian transition in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 340-353.
- [29] 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: 1-28.
- [30] 杨钟健. 中国早期脊椎动物化石之分布[J]. *地质论评*, 1939, 4(6): 413-421.
- [31] 潘江. 中国泥盆纪鱼化石及其在地层上和地理上的分布[G]. *中国地质学基本资料专题总结论文集(第1号)*. 北京: 地质出版社, 1957, 1: 1-14.
- [32] 潘江. 华南几种泥盆纪及石炭纪鱼化石[J]. *古生物学报*, 1964, 12(1): 139-168.
- [33] Zhu M, Gai Z K. Phylogenetic relationships of galeaspids (Agnatha)[J]. *Vertebrata Palaeotica*, 2006, 44(1): 1-27.
- [34] 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.
- [35] 盖志琨, 朱敏. 浙江安吉志留纪真盔甲鱼类一新属[J]. *古脊椎动物学报*, 2005, 43(3): 165-174.
- [36] Wang N Z. Two new Silurian galeaspids (jawless craniates) from Zhejiang Province, China, with a discussion of galeaspid-gnathostome relationships[M]// Chang M M, Liu Y H, Zhang G R. *Early Vertebrates and Related Problems of Evolutionary Biology*. Beijing: Science Press, 1991: 41-66.
- [37] 潘江, 曾祥渊. 湘西早志留世溶溪组无颌类的发现及其意义[J]. *古脊椎动物学报*, 1985, 23(3): 207-213.
- [38] 朱敏, 刘玉海, 贾连涛, 等. 云南曲靖地区志留纪罗德洛世真盔甲鱼类一新属[J]. *古脊椎动物学报*, 2012, 50(1): 1-7.
- [39] 刘时藩. 四川秀山无颌类化石[J]. *古脊椎动物与古人类*, 1983, 21(2): 97-102.
- [40] 潘江, 陈烈祖. 皖北志留纪盔甲鱼类的新发现[J]. *古脊椎动物学报*, 1993, 31(3): 225-230.
- [41] 潘江, 王士涛, 刘运鹏. 中国南方早泥盆世无颌类及鱼类化石[G]// *地层古生物论文集第1辑*. 北京: 地质出版社, 1975, 1: 135-169.
- [42] 王俊卿, 王念忠, 朱敏. 塔里木盆地西北缘中、古生代脊椎动物化石及相关地层[M]// 董晓光, 梁狄刚, 贾承造. *塔里木盆地石油地质研究新进展*. 北京: 科学出版社, 1996: 8-16.
- [43] 黎作骢. 论湖北含中华棘鱼层位的时代问题[J]. *地层学杂志*, 1980, 4(3): 221-225.
- [44] 卢立伍, 潘江, 赵丽君. 新疆柯坪中生代无颌类及鱼类新知[J]. *地球学报*, 2007, 28(2): 143-147.
- [45] 傅力浦, 宋礼生. 陕西紫阳地区(过渡带)志留纪地层及古生物[J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 1986, 14: 1-198.
- [46] Pan J. New Galeaspids (Agnatha) from the Silurian and Devonian of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-86.
- [47] 王士涛, 夏树芳, 杜森官, 等. 安徽巢县志留纪无颌类和鱼类化石的发现及其地层意义[J]. *中国地质科学院院报: 地质研究所分刊*, 1980, 1(2): 101-112.
- [48] 盖志琨, 朱敏, 赵文金. 浙江长兴志留纪真盔甲鱼类新材料及真盔甲鱼目系统发育关系的讨论[J]. *古脊椎动物学报*, 2005, 43(1): 61-75.
- [49] 王俊卿, 王念忠, 张国瑞, 等. 新疆柯坪志留纪兰多维列世无颌类化石[J]. *古脊椎动物学报*, 2002, 40(4): 245-256.
- [50] 潘江, 王士涛. 盔甲鱼类在华南的新发现[J]. *古生物学报*, 1980, 19(1): 1-7.
- [51] 王士涛, 郭宪璞, 金若谷, 等. 塔里木盆地志留纪脊椎动物的特征及其沉积相、古环境. *地质通报*, 2011, 30(8): 1220-1227.
- [52] 潘江, 王士涛. 江西修水西坑组多鳃鱼目化石一新科[J]. *古生物学报*, 1983, 22(5): 505-509.
- [53] 安徽省地质矿产局. *安徽省区域地质志*[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-721.
- [54] 江苏省地质矿产局. *江苏省岩石地层*[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-288.
- [55] 王俊卿. 湘西北志留纪胴甲鱼化石[J]. *古脊椎动物学报*, 1991, 29(3): 240-244.
- [56] Zhang G R, Wang S T, Wang J Q, et al. A basal antiarch (placoderm fish) from the Silurian of Qujing, Yunnan, China[J]. *Palaeoworld*, 2010, 19(1/2): 129-135.
- [57] Brazeau M D. The braincase and jaws of a Devonian 'acanthodian' and modern gnathostome origins[J]. *Nature*, 2009, 457: 305-308.
- [58] Davis S P, Finarelli J A, Coates M I. *Acanthodes* and shark-like conditions in the last common ancestor of modern gnathostomes[J]. *Nature*, 2012, 486: 247-250.
- [59] Janvier P, Racheboeuf P, Nguyễn Hữu H, et al. Devonian fish (Placodermi, Antiarcha) from Tra Ban Island (Bai Tu Long Bay, Quang Ninh Province, Vietnam) and the question of the age of the Dô Son Formation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21: 795-801.
- [60] Zhao W J, Zhu M. Siluro-Devonian vertebrate biostratigraphy and biogeography of China[J]. *Palaeoworld*, 2010, 19(1/2): 4-26.
- [61] Benton M J. *Vertebrate Palaeontology*[M]. 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2005: 1-455.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] Zhu M. Early Silurian *Sinacanthus* (Chondrichthys) from China[J]. *Palaeontology*, 1998, 41(1): 157-171.
- [65] 刘时藩. 中国的棘鱼鳍刺化石[J]. *古生物学报*, 1997, 36(4): 473-484.
- [66] Sansom I J, Aldridge R J, Smith M M. A microvertebrate

- fauna from the Llandovery of South China[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 2000, 90: 255-272.
- [67] 曾祥渊. 湘西溶溪组的棘鱼化石及其层位[J]. 古脊椎动物学报, 1988, 24(4): 287-295.
- [68] 江西省地质矿产局. 江西省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-375.
- [69] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1-688.
- [70] 湖南省地质矿产局. 湖南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-292.
- [71] 刘时藩. 华南泥盆纪棘鱼化石新材料及其意义[J]. 古脊椎动物与古人类, 1973, 11(2): 144-147.
- [72] 刘时藩. 塔里木西北的中华棘鱼化石及地质意义[J]. 古脊椎动物学报, 1995, 33(2): 85-98.
- [73] 潘江, 王士涛. 中国南方泥盆纪无颌类及鱼类化石[C]// 中国地质科学院地质矿产研究所. 华南泥盆系会议论文集. 北京: 地质出版社, 1978: 298-333.
- [74] 王朴, 胡继宗, 宋杉林, 等. 新疆柯坪地区 *Sinacanthus* 的发现及其地层意义[J]. 新疆地质, 1988, 6(3): 47-50.
- [75] 黎作骢. 鄂东南志留纪中华棘鱼的发现及其时代讨论[C]// 中国地质科学院地质矿产研究所. 华南泥盆系会议论文集. 北京: 地质出版社, 1978: 63-67.
- [76] 王念忠, 张师本, 王俊卿, 等. 新疆巴楚早志留世软骨鱼类微体化石[J]. 古脊椎动物学报, 1998, 36(4): 257-267.
- [77] Zhu M, Yu X B, Choo B, et al. Fossil fishes from China provide first evidence of dermal pelvic girdles in osteichthyans [J]. PLoS One, 2012, 7(4): 1-9(e35103).
- [78] Qiao T, Zhu M. Cranial morphology of the Silurian sarcopterygian *Guiyu oneiros* (Gnathostomata: Osteichthyes) [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(12): 1836-1848.
- [79] Pan J, Dineley D L. A review of early (Silurian and Devonian) vertebrate biogeography and biostratigraphy of China[C]// Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences. 1988, B235(1278): 29-61.
- [80] Wang S T. Vertebrate biostratigraphy of the Middle Palaeozoic of China[M]// Long J A. Palaeozoic Vertebrate Biostratigraphy and Biogeography. London: Belhaven Press, 1993: 252-276.
- [81] 国际地层委员会. 国际地层表[J]. 地层学杂志, 2013, 37(1): 1.
- [82] Sadler P M, Cooper R A, Melchin M. High-resolution, Early Paleozoic (Ordovician-Silurian) time scale[J]. Geological Society of America Bulletin, 2009, 121: 887-906.
- [83] 王成源. 再论华南志留系红层的时代[J]. 地层学杂志, 2011, 35(4): 440-447.
- [84] 王怿, 戎嘉余, 徐洪河, 等. 湖南张家界地区志留纪晚期地层新见兼论对小溪组的厘定[J]. 地层学杂志, 2010, 34(2): 113-126.
- [85] 耿良玉, 王玥, 张允白, 等. 扬子区后 Llandovery 世(志留纪)胞石的发现及其意义[J]. 微体古生物学报, 1999, 16(2): 111-151.
- [86] 王怿, 张小乐, 徐洪河, 等. 重庆秀山志留系小溪组的发现与迎星哨组的厘定[J]. 地层学杂志, 2011, 35(2): 113-121.
- [87] 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.
- [88] 方宗杰, 蔡重阳, 王怿, 等. 滇东曲靖志留-泥盆系界线研究的新进展[J]. 地层学杂志, 1994, 18(2): 81-90.
- [89] 王俊卿. 玉龙寺组的时代: 兼论滇东的志留系-泥盆系界线[J]. 地层学杂志, 2000, 24(2): 144-150.
- [90] Valiukevičius J. Silurian acanthodian succession of the Lūžņi-4 borehole (Latvia) [J]. Acta Universitatis Latviensis, 2004, 679: 119-147.
- [91] Zhao W J, Herten U, Zhu M, et al. Carbon isotope stratigraphy across the Silurian-Devonian transition in Zoige (West Qinling), China [J]. Bollettino della Società Paleontologica Italiana, 2010, 49(1): 35-45.
- [92] 张师本, 高琴琴, 陈钦保, 等. 塔里木盆地西北缘志留-泥盆纪地层研究新进展[M]// 董晓光, 梁狄刚, 贾承造. 塔里木盆地石油地质研究新进展. 北京: 科学出版社, 1996: 54-66.
- [93] 王成源. 华南志留系红层的时代[J]. 地层学杂志, 1998, 22(2): 127-128.
- [94] 陈旭, 戎嘉余. 中国扬子区兰多维尔统特别奇阶及其与英国的对比[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-162.
- [95] 林宝玉. 中国地层 6: 中国的志留系[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-245.
- [96] 侯鸿飞, 王士涛, 等. 中国地层 7: 中国的泥盆系[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-329.
- [97] 蔡重阳. 非海相泥盆系[M]// 中国科学院南京地质古生物研究所. 中国地层研究二十年 (1979-1999). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 95-127.
- [98] 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): 95-115.
- [99] 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. 西秦岭绿曲、迭部地区晚志留世与泥盆纪地层古生物(下册)[M]. 南京: 南京大学出版社, 1987: 1-450.
- [100] 穆恩之, 陈旭, 倪寓南, 等. 广西钦州、玉林一带志留纪及泥盆纪地层的新观察[J]. 地层学杂志, 1983, 7(1): 60-63.
- [101] 穆恩之, 陈旭, 倪寓南, 等. 广西钦州、玉林地区的志留系与泥盆系[J]. 地层学杂志, 1988, 12(4): 241-254.
- [102] 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]. Vertebrate Palaeontology, 2012, 50(4): 241-254.
- [103] Zhao W J, Jia G D, Zhu M. New evidence for the Silurian/Devonian boundary in the Changwantang Section, Guangxi Province, South China [C]// Lindskog A, Mehlqvist K. Proceedings of the 3rd IGCP591 Annual Meeting-Lund, Sweden, 9-19 June 2013. Lund: Lund University, 2013: 356-357.