

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.023>



青白口纪宏观藻类生物群及其古地理意义

刘傲然^{1,2},冯庆来^{1,3*},田立富²

1.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

2.河北地质大学资源学院,河北石家庄 050031

3.中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

摘要:Rodinia超级大陆演化作为前寒武纪重要科学问题,一直备受关注。古生物地理区系作为解决古板块地理位置重建的有效手段,在Rodinia超级大陆恢复方面应用较少。龙凤山生物群是新元古代早期宏观藻类代表性生物群之一,其以*Chuaria-Tawuia-Longfengshania*为组合特征的宏观藻类在新元古代早期(1 000~780 Ma)广泛分布在赤道及低纬度地区的温暖滨海静水环境中。根据全球现有可靠的生物群落资料,进行了古生物地理分析,结果表明:此时期宏观藻类可划分为一个赤道附近低纬度地区宏观藻类生物域,域内包括以含底栖固着*Longfengshania*为特征的华北—加拿大(*Chuaria-Tawuia-Longfengshania*)区和仅有简单浮游藻类为特征的扬子—印度(*Chuaria-Tawuia*)区;古生物地理分布特征表明青白口纪 Rodinia 超级大陆中华北板块与劳伦古陆相邻、位于超大陆东缘,而扬子克拉通靠近印度板块、位于超大陆西部。

关键词:龙凤山生物群;古生物地理;宏观藻类;Rodinia超级大陆;古生物。

中图分类号:P52

文章编号:1000-2383(2018)02-0475-16

收稿日期:2017-11-17

The Qingbaikou Macroalgae Biota and Their Implications for Rodinia Reconstruction

Liu Aoran^{1,2}, Feng Qinglai^{1,3*}, Tian Lifu²

1.School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2.College of Resource, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

3.State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The evolution of Rodinia supercontinent has always been of concern as an important scientific issue. Paleobiogeographic region analysis, as an effective method to solve the problem of the tectonic reconstruction of the continental masses, has rarely been applied to Rodinia. Longfengshan biota, characterized by *Chuaria-Tawuia-Longfengshania*, is one of the typical biota, whose biotic factor can be found globally, in the nearshore shallow water basin and Lagoon, Tonian. According to the reliable existing biota data reported globally, we make the paleobiogeographic analysis, zoning them into North China Craton-North Laurentia region (*Chuaria-Tawuia-Longfengshania*) and Yangtze Craton-India Craton region (*Chuaria-Tawuia*), constitute a low-latitude-Macroalgae realm (1 000–780 Ma). Furthermore, we have a new cognition on the position of North China Craton, in the east of Rodinia supercontinent, near Laurentia Craton, and Yangtze Craton in the west, close to India Craton.

Key words: Longfengshan biota; paleobiogeography; macroalgae; Rodinia supercontinent; paleontology.

Rodinia超级大陆作为前寒武纪超级大陆演化中的重要角色之一,从20世纪80年代至今一直是

前寒武纪研究的热点和前沿领域,尽管其主要陆块的相对位置基本确定,但是部分陆块的大地构造位

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2011CB808800)。

作者简介:刘傲然(1988—),男,讲师,博士研究生,从事古生物学与地史学的研究工作,ORCID:0000-0003-3847-9726,E-mail:aoranliu@cug.edu.cn

*通讯作者:冯庆来,E-mail:qinglaifeng@cug.edu.cn

引用格式:刘傲然,冯庆来,田立富,2018.青白口纪宏观藻类生物群及其古地理意义.地球科学,43(2):475—490.

置恢复仍存在分歧(Hoffman, 1991; Li *et al.*, 1995; Wingate *et al.*, 2002). 扬子和华北板块在 Rodinia 超级大陆中的位置就是长期争论的实例之一. 近年来随着研究的深入, 学者们取得了一系列成果, 包括 Rodinia 时期岩浆构造事件(Wang *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2014)、精确的古地磁数据(Zhang *et al.*, 2006, 2013; Li *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2015)、沉积物源分析(Zhou *et al.*, 2006)、沉积地层对比(Li *et al.*, 1996; Jiang *et al.*, 2003)等, 对华北、扬子板块在 Rodinia 超级大陆中的位置有了更深刻的认识, 提出了一些重建模式, 但这些认识和模式分歧仍然很大(Zhang *et al.*, 2006, 2013; Zhou *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008).

在显生宙古板块恢复中, 古生物地理区系证据是古板块位置恢复的关键依据之一, 能够起到更好的效果(殷鸿福, 1988; 黄宝春等, 2008; 牛志军和吴俊, 2015). 但由于前寒武纪生物信息的局限性, 该方法在前寒武纪板块重建中较少运用(唐烽等, 2009a). 随着新元古代古生物信息资料的积累(Amard, 1992; Vidal *et al.*, 1993; Hofmann and Rainbird, 1994; Du *et al.*, 1995; Xiao *et al.*, 2002; Dutta *et al.*, 2006), 宏观藻类被公认为新元古代早期属种繁盛、形态稳定、全球分布广泛的生物类型. 本文试图以新元古代青白口纪宏观藻类在全球范围内的生物组合、分布、变化特征为依据, 对这一时期宏观藻类进行古生物地理区系划分, 利用划分结果对华北、扬子板块在 Rodinia 超级大陆中的位置提出古生物地理区系依据, 为古板块重建提供参考.

1 青白口纪宏观藻类生物特征

新元古代是宏观藻类繁盛的时期, 不分枝的简单浮游和底栖固着宏观藻类是新元古代冰期之前最繁盛的生物属种(Planavsky *et al.*, 2015). 以往报道的生物属种非常丰富, 主要依照形态特征进行定名, 研究表明部分化石表面纹饰为后期成岩变形所致、部分化石为微生物聚合体(Amard, 1992; Schopf, 1994), 故同物异名现象严重. 因此, 在系统分析前人研究结果的基础上重新厘定分类成果, 是该时期古生物地理分区研究的基础.

以往研究成果显示, 青白口纪宏观藻类以 Chuariaceae, Tawuiaceae, Longfengshaniceae 为主(Hofmann and Altken, 1979; Du and Tian, 1985; Hofmann, 1985; Amard, 1992; Butterfield, 2001),

共 3 科 10 属 21 种(表 1). 此时期内, Chuariaceae 仅包括 *Chuaria* 1 个属, 属内仅有 1 种 *C. circular* (Walcott, 1899; 图 1a), 轮廓为圆盘状, 具碳质印模, 半径为 0.5~5.0 mm(Ford and Breed, 1973), 而根据成岩作用形成的不稳定的表面纹饰划分的 *C. annulris* (Zheng, 1980)、*C. lobutus* (Du *et al.*, 1995)、*C. multirygosa* (Duan, 1982) 皆为 *C. circular* 同物异名体, 粒径更大的圆盘状碳质印模化石则并入 *Beltanelloides* (Ivantsov *et al.*, 2014); Tawuiaceae 仅包括 *Tawuia* 1 个属, 属内仅有 1 种 *T. dalensis* (Hofmann, 1977), 轮廓为笔直或弯曲的带状、香肠状及保存过程中形成的一端收缩的椭圆形或棒形(Hofmann, 1985), 统计学分析显示其宽为 1.0~8.5 mm, 长轴从 2 mm 至数厘米连续分布, 形态学上将其分为 I、J、C、U 四种类型(Hofmann, 1977, 1985; 图 1s~1x), 且世界范围内短棒状 *Nephyroformia* (Zheng, 1980) 与 *Phascolites* (Duan, 1982)、椭圆形 *Shouhsenia* (Xing *et al.*, 1982)、舌形 *Glossophyton* (Duan, 1982)、卵圆形 *Ovidiscina* (Zheng, 1980)、鞋底形 *Pumilibaxa* (Zheng, 1980) 及其伸长个体的尺寸与形态皆未超出 *Tawuia* 的定义范围, 皆为 *Tawuia* 的同物异名体(Hofmann, 1985), 相同的情况也发生在 Duan (1982) 命名的 *T. siensis* 和 Fu(1989) 命名的 *T. afflata* 及其新属 *Tachymacrus*、*Mesonactas*, 均为 *Tawuia*s 的同物异名体(Hofmann, 1985). 同时 Hofmann(1985) 认为 *T. dalensis* 端部表面不稳定的同心环纹饰, 以及其他地区出现的表面纵向条纹结构都应为成岩作用所致, 故 *T. striatia* (Zheng, 1980) 亦为 *T. dalensis* 的同物异名体, 这一结论得到其他研究者的认同(Amard, 1992; 唐烽和高林志, 1999; Butterfield, 2001). 本文的形态学分类亦沿用该修订结果. Longfengshaniceae 形态为由叶状体、明显发育的拟茎(不包括短小的尖状突出物)和部分保存的固着器三部分组成的宏观藻类碳质印模化石, 包括 *Longfengshania* (Duan, 1982), *Paralongfengshania* (Du and Tian, 1985) 2 个属, 前者属内主要为以稳定的叶状体形态、尺寸和拟茎发育程度而划分的 12 个种, 包括叶状体为椭圆形的 *L. stipitata* (Du and Tian, 1985; 图 1b)、卵圆形的 *L. ovalis* (Du and Tian, 1985; 图 1q)、楔形的 *L. gemmiforma* (Du and Tian, 1985; 图 1p)、球形的 *L. sphenia* (Du and Tian, 1985; 图 1i)、小铲形的 *L. foliolatusa* (Du *et al.*, 1995; 图 1j)、窄带状(宽约 1.5 mm,

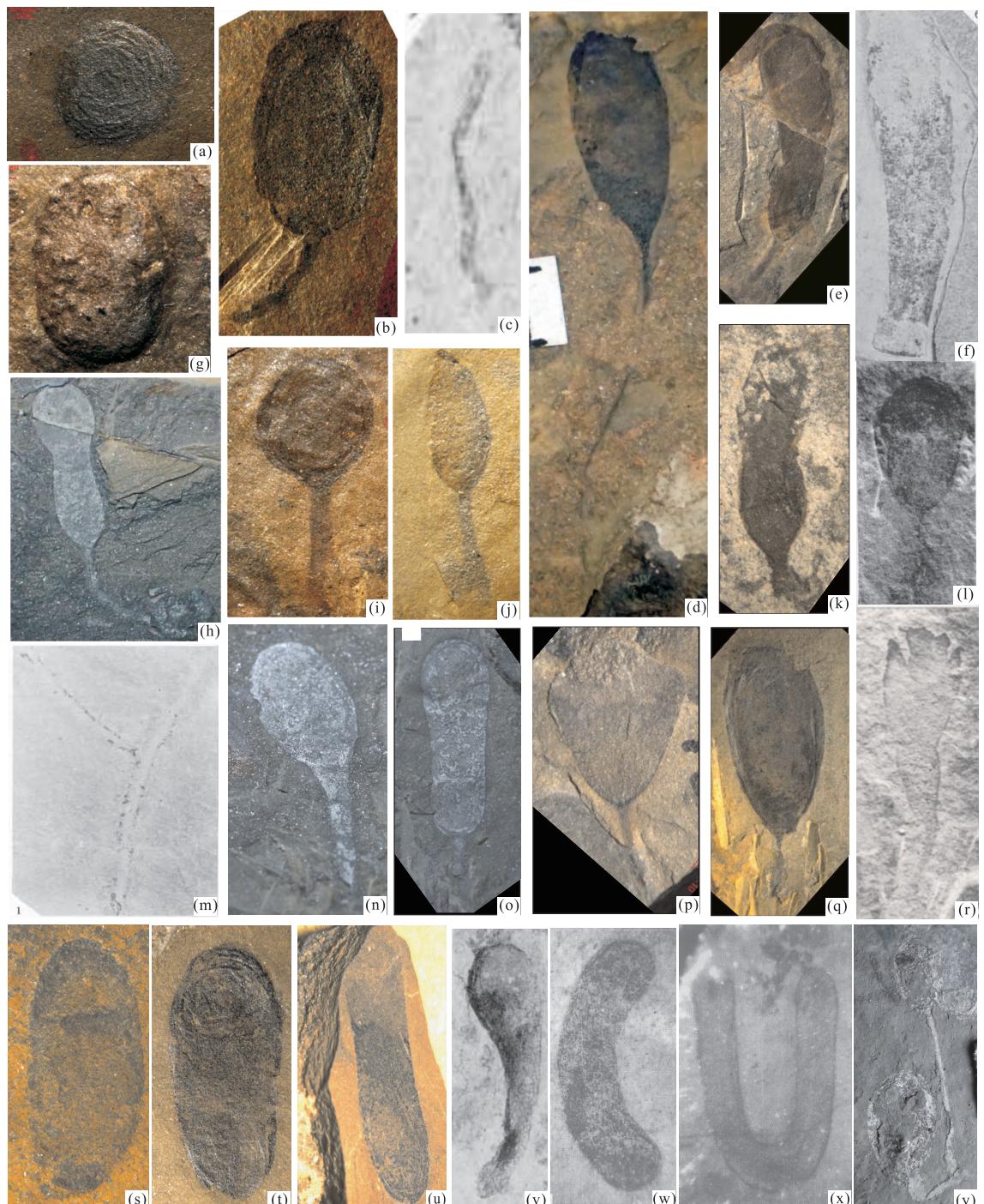


图1 新元古代早期宏观藻类代表性分子

Fig.1 Typical macroalga in the Early Neoproterozoic

a.*Chuaria circularis*; b.*Longfengshania stipitata*; c.*Tyrasotaenia* sp.; d.*Longfengshania longipetiolata*; e, o.*Longfengshania elongata*; f.*Beltina danai*; g.*Morania antique*; h.*Paralongfengshania sicyoides*; i.*Longfengshania sphaeria*; j.*Longfengshania foliolatusa*; k.*Longfengshania stenophylla*; l.*Paralongfengshania qinyensis*; m.*Daltaenia mackensiensis*; n.*Longfengshania qingbaikouensis*; p.*Longfengshania gemmiforma*; q.*Longfengshania ovalis*; r.*Paralaminaria xinglongensis*; s~x.*Tawua dalensis*, s~u为Morphotype I (M.I), v为M.J, w为M.C, x为M.U; y.*Longfengshania dicrana*; 除图d比例尺为10 mm外,其他比例尺均为1 mm;图c,f,l,v引自Hofmann(1985)的图版39,图w和x引自符俊辉(1989)的图版II

与拟茎比值为3)的*L. stenophylla* (Tang, 1995)和叶状体强烈伸长(长大于10 mm, 长宽比大于4)的

L. elongate (Du and Tian, 1985; 图 1e, 1o), 以及拟茎很长(大于10 mm, 最长可达55 mm)的*L.*

表 1 新元古代早期宏观藻类属种与分布
Table 1 The Early Neoproterozoic macroalgae and their distribution

生物化石	华北板块	扬子板块	劳伦古陆板块	印度古陆板块	海南岛
未定科					
<i>Beltina danai</i>	+	+	-	-	-
<i>Daltaenia mackenziensis</i>	-	+	-	-	-
<i>Tyrasotaenia</i> sp.	-	+	-	-	-
<i>Morania antique</i>	+	+	-	-	-
<i>Paralaminaria xinglongensis</i>	+	-	-	-	-
Chuariaceae					
<i>Chuaria circularis</i>	+	+	+	+	+
Tawuiaceae					
<i>Tawuia dalensis</i>					
M. I	+	+	+	+	+
M. J	+	+	-	-	+
M. C	+	+	-	-	+
M. U	+	+	-	-	+
Longfengshaniceae					
<i>Longfengshania ovalis</i>	+	+	-	-	-
<i>L.gemmiforma</i>	+	-	-	-	-
<i>L.dicrana</i>	+	+	-	-	-
<i>L.elongata</i>	+	+	-	-	-
<i>L.stipitata</i>	+	+	-	-	-
<i>L.sphaeria</i>	+	+	-	-	-
<i>L.longipetiolata</i>	+	+	-	-	-
<i>L.qingbaikouensis</i>	+	+	-	-	-
<i>L.stenophylla</i>	+	-	-	-	-
<i>L.foliolatua</i>	+	-	-	-	-
<i>Paralongfengshania sicyoides</i>	+	-	-	-	-
<i>Pa.qinyuensis</i>	+	-	-	-	-

longipetiolata (Du and Tian, 1985; 图 1d)、拟茎粗壮且茎基膨胀的 *L. qingbaikouensis* (萧宗正, 1990; 图 1n)、拟茎分叉(一次二歧式)的 *L. dicrana* (Du et al., 1995; 图 1y);后者一般个体较大,根据叶状体纵向近中央明显缢缩程度被划分为均等缢缩的葫芦状 *P. sicyoides* (Du and Tian, 1985; 图 1h)、以及非均等近折线缢缩的似串珠状 *P. qinyuensis* (Tang, 1995; 图 1l).

此外 *Beltina danai* (Walcott, 1899; 图 1f), *Daltaenia mackenziensis* (Hofmann, 1985; 图 1m), 或地方性生物因子 *Tyrasotaenia* sp. (Hofmann, 1985; 图 1c) 及轮廓为海带形的 *Paralaminaria xinglongensis* (Du and Tian, 1985, 图 1r) 以明显的形态差异与此时期内其他生物因子区分开,而短粗状椭圆形 *Morania antique* (Hoffman, 1985; 图 1g) 则以长宽比值小于 1.5 与 *T. dalensis* 区分开 (Hofmann, 1985; 图 1s~1x), 为寒武纪的绿藻类优势属种 (杨瑞东等, 2002). 以上 5 种生物化石由于只存在青白口纪并非全球性分布,且以往研究程度较低,故只作为此时期内宏观藻类的非特征属种.

2 青白口纪宏观藻类全球分布与对比

宏观藻类在新元古代地层中多有出现 (Dutta et al., 2006), 以往报道的化石特征显著,但也有特殊情况存在:生物特征迥异,个体极小不到 0.5 mm (Knoll, 1982; Damassa and Knoll, 1986; Kumar, 2001; 孙淑芬等, 2004; Porter, 2006) 为光球疑源类 (Hofmann, 1985) 或有机质碎片;层位特征不明显,宏观藻类并非优势属种,时代属于伊迪卡拉纪或更晚 (陈孟羲和郑文武, 1986; Amard, 1992; Vidal et al., 1993; Xiaojiao et al., 2002; Xu, 2002; 唐烽等, 2009b);形态特征不明显,形态极不稳定或呈碎片状 (林蔚兴和邢裕盛, 1984),不能准确地进行生物属种鉴定和对比. 经过系统厘定,新元古代早期可与龙凤山生物群对比的化石点分布于 16 个地区,位于华北板块、扬子板块、劳伦古陆西北缘及古印度板块上.

2.1 华北板块宏观藻类

华北燕山地区青白口系发育完整,包含骆驼岭组和景儿峪组 (1 000~800 Ma; Gao et al., 2008). 骆驼岭组由滨海潮间带的碎屑岩及泥质岩组成,分为两个岩性段,一段为砂砾岩段,二段为砂页岩段,总

厚度为 70.1 m,二段 22 层为含化石层位(Du and Tian, 1985),化石产于块状黑色页岩和具水平层理的泥质与粉砂质互层的粘土岩中,其矿物成分主要由伊利石组成,含有少量的高岭石、绢云母、石英碎屑,显微镜下可见细条带状铁元素聚合体。

“龙凤山生物群”是青白口纪代表性宏观藻类生物群之一,指青白口纪燕山山脉河北北部地区青白口纪骆驼岭组砂泥质页岩中发现的由叶状体、拟茎和固着器三部分组成的宏观藻类,并以 *Longfengshania* 为特征分子,包括共生的 *Chuaria*、*Tawuia* 区域特色生物群的总称 (Du and Tian, 1985), *Longfengshania* 被认为是最早的具柄底栖固着的宏观藻类(Butterfield, 2001).其最早发现于燕山西段河北省张家口市怀来龙凤山,之后在河北省平泉、宽城、丰润、古冶、兴隆、怀来与天津蓟县及北京等地皆有发现,地理位置在 $115^{\circ} \sim 120^{\circ}$ E, $39^{\circ} 40' \sim 41^{\circ} 21'$ N 范围内,区内化石层位稳定,均分布在骆驼岭组二段页岩中.Du et al.(1995)根据以往化石层位上下地球化学测年数据推测龙凤山生物群年龄为 900~850 Ma.怀来龙凤山剖面为龙凤山生物群代表剖面,宏观藻类最丰富,除个别属种发现于北京芹峪、青白口剖面外,多数属种均产于此地,化石共计 3 科 5 属 16 种:Chuariaceae 科的 *Chuaria circularis*, Tawuiaceae 科的 *Tawuia dalensis*, Longfengshaniaceae 科的 *Longfengshania stipitata*、*L. elongata*、*L. longipetiolata*、*L. foliolatus*、*L. gemmiforma*、*L. sphenia*、*L. dicrana*、*L. qingbaikouensis*、*L. ovalis*、*L. stenophylla*、*Paralongfengshania sicyoides*、*P. qinyensis*、*Paralaminaria xinglongensis*、*Morania antique*(图 1).特征属为 *Chuaria*、*Tawuia* 和 *Longfengshania*.*C. circularis* 一般个体较大,直径集中在 3~6 mm 之间,边缘带宽窄不同,有些无边缘带,部分化石表面具简单的同心环;*T. dalensis* 大小差异较大,形态为 I 和 J 形,纹饰较少,最长不超过 15 mm,最小约为 3 mm; *Longfengshania* 为龙凤山生物群特征属,叶状体形态多样,表面纹饰简单,偶有颗粒出现,拟茎清晰,部分具不规则固着器;*M. antique* 长为 3~4 mm,宽度不超过 3 mm,长宽比值小于 1.5(图 1g),为浮游生物.*Paralaminaria xinglongensis* 由叶状体和拟茎组成,叶状体上宽下窄,两侧对称,拟柄基部假根不明显,Du et al.(1995)认为其为更高等的真核底栖固着藻类(图 1r).以往骆驼岭组沉积相综合分析表明含化石的二段沉积序列由浅水陆棚与海滩体系

组成,地球化学的特征分析反映为近海潮间带的沉积环境(Du et al., 1995).化石层位上下的微生物席说明水体不是很深,具水平纹理的页岩与块状泥岩指示为静水泻湖沉积环境,保存完好的宏观藻类化石亦说明水动力较弱.古地磁数据显示,青白口纪燕山地区基本位于 $13^{\circ} \sim 18^{\circ}$ N 之间(张惠民, 1995),气候温暖,适合藻类生活.综上所述,龙凤山生物群生活环境为气候温暖、水动力较弱的滨海近岸半封闭的泻湖环境.

燕山西段北京地区青白口系芹峪、青白口、昌平剖面与怀来剖面比较,化石层位岩性一致,沉积环境相似(唐烽和高林志, 1999);总体含宏观藻类 *Chuaria*、*Tawuia* 和 *Longfengshania*,不同剖面情况略有差异,较之怀来剖面其生物属种减少,峰值降低,椭圆形化石次之(萧宗正, 1990; 唐烽和高林志, 1999).西山芹峪、青白口剖面以 *Tawuia* 和 *Longfengshania* 为主,宏观藻类化石 3 科 4 属 9 种: Chuariaceae 科的 *Chuaria circularis*, Tawuiaceae 科的 *Tawuia dalensis*, Longfengshaniaceae 科的 *Longfengshania qingbaikouensis*、*L. elongata*、*L. longipetiolata*、*L. ovalis*、*L. stipitata*、*L. stenophylla*、*Paralongfengshania qinyensis*.青白口剖面无柄化石个体小,*C. circularis* 少,*T. dalensis* 为较短的 I 形,*Chuaria* 和 *Longfengshania* 拟茎较粗壮.两地古地理环境略显特化,为区内盐度与深度陡增的静水泻湖环境(唐烽和高林志, 1999).昌平剖面化石数量较芹峪、青白口剖面增多,化石组合为小型 *C. circularis* 和碎片状 *Longfengshania*,呈簇状分布(唐烽和高林志, 1999).蓟县地区骆驼岭组为潮间带砂岩和页岩为主的沉积,宏观藻类化石含量较少,仅含浮游类,共 2 科 3 属: Chuariaceae 科的 *Chuaria circularis*, Tawuiaceae 科的 *Tawuia dalensis* 及 *Morania antique*; *C. circularis* 为主,其次为较短的 I 形 *T. dalensis*(长为 1~2 mm 最常见; 朱士兴等, 1994), *M. antique* 零星出现.

燕山东段以兴隆梨树沟剖面为代表,与怀来剖面相比岩性基本不变,化石层位薄,生物分异度降低,化石含量小.化石多密集共生,长为 5~8 mm 的个体较多,个体较大,最长达 32 mm,共 3 科 4 属 9 种,包括 Chuariaceae 科的 *Chuaria circularis*, Tawuiaceae 科的 *Tawuia dalensis*, Longfengshaniaceae 科的 *Longfengshania stipitata*、*L. gemmiforma*、*L. longipetiolata*、*L. ovalis*、*L. elongata*、*Morania antique* 及与现代海带相似的 *Paralami-*

naria xinglongensis、*C. circularia* 个体长轴以 2~4 mm 为主, *T. dalensis* 多为较宽 I 形。向东相邻的宽城地区仅有一处化石点, 为浮游生物相, 化石含量较少, 类型单一, 个体较小, 长轴以 1~3 mm 为主, 主要有圆形 *C. circularis* 及较短 I 形 *T. dalensis*, *M. antique* 个体较小。丰润一带青白口系发育不全, 化石点在丰润古庄和古治毛山两地, 类型较少, 个体偏小, 以 *C. circularis* 为主, 长轴均值为 1.53 mm, 最小仅为 0.8 mm, 最大为 3.3 mm; *T. dalensis* 为较短 I 形, 最长不超过 4 mm, 缺少 *Longfengshania* 类化石。承德平泉地区化石零星出现, 为浮游相 *C. circularis* 和 *T. dalensis*, 化石形态、大小与宽城剖面相似(Du et al., 1995), 相邻的辽西凌源大河北乡长龙山组页岩中发现 *L. elongata*(朱士兴等, 1994)。

辽宁地区青白口系包括钓鱼台组—南芬组, 钓鱼台组碎屑锆石年龄指示其沉积年龄不会晚于 924 Ma(Yang et al., 2012), 同时以往 K-Ar 法测年数据及可对比微体化石(唐烽, 2009b)表明钓鱼台组—南芬组中宏观藻类时限为 924~780 Ma。以复州、金县产出的 *Chuaria-Tawuia* 为组合的浮游宏观藻类代表早期的“辽南生物群”(林蔚兴和邢裕盛, 1984; 洪作民等, 1991; 唐烽等, 2009b)。区内新元古代普遍发育的碳酸盐岩和碎屑岩混合相沉积地层, 化石均产于灰黑色、黄绿色页岩中。宏观藻类 2 科 3 属 4 种: *Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularia*, *Tawuiaceae* 科的 *Tawuia dalensis* 及非特征属种 *Beltina danai*、*Morania antique*。钓鱼台组以 *C. circularis* 为主, 以 1.5~2.5 mm 最为常见; 南芬组以 I 形 *T. dalensis* 为主, 长轴为 3.5~10 mm, 分异度低; *B. danai* 较小, 轮廓近棒球杆状(图 1f), 零星出现, 为此时期非特征属种浮游生物。以往报道的化石显示, 辽南地区无确定的 *Longfengshania*(洪作民等, 1991), 但与相邻兴隆、辽西剖面的对比结果表明, 此区域内具有 *Longfengshania* 发育的潜力(朱士兴等, 1994; Du et al., 1995), 化石采集工作有待进一步开展。

华北板块南缘—淮南地区可对比的宏观藻类产于安徽寿县早新元古代刘老碑组, 代表早期“淮南生物群”, 以浮游相的 *Chuaria-Tawuia* 为组合特征(Duan, 1982; 符俊辉, 1989), 符俊辉(1989)根据测年数据推测其年龄值大约为 850 Ma, 稳定同位素数据以及具有全球对比意义的 *Trachyhystrichosphaera aimika* 等带刺疑源类微体化石指示刘老碑组

属于拉伸系, 可与燕山地区青白口纪骆驼岭组及景儿峪组对比(1 000~800 Ma; Xiao et al., 2014)。刘老碑组中宏观藻类包含 2 科 2 属 4 种: *Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularia*, *Tawuiaceae* 科的 *Tawuia dalensis* 以及 *Beltina danai*、*Morania antique*。*Chuaria* 个体长度为 2.8~4.2 mm, 表面多有成岩过程中形成的纹饰及边缘带; *T. dalensis* 形态分异度高, 包含 I、J、C 和 U 形四种形态, 个体普遍较大, 长轴为 2.3~15 mm, 最大超过 60 mm(符俊辉, 1989; 唐烽等, 2009b); *B. danai* 数量较多。

综上所述, 华北板块新元古代早期宏观藻类以 *Chuaria-Tawuia-Longfengshania* 组合为代表(表 1), *Tawuia*、*Longfengshania* 形态分异度较高, *Tawuia* 具 I、J、C 和 U 四种形态, 以怀来龙凤山为中心, 向东南方向北京—蓟县地区和东北方向兴隆—凌源—辽南地区宏观藻类呈梯度变化: 分异度降低、个体变小。京西总体与怀来生物相差不大, 水体特化现象明显(唐烽和高林志, 1999); 而昌平、蓟县地区未明确出现 *Longfengshania*。向东北方向燕山东段、兴隆及辽宁西部尚有 *Longfengshania* 外, 再往东至辽南地区无确定 *Longfengshania* 的出现, 皆为浮游藻类, 兴隆地区出现的拟海带属 *Paralaminaria xinglongensis* 说明底栖生物与怀来、京西等地不同, 可能为构造运动引起的局部上升(唐烽和高林志, 1999)造成物源变化所致。辽南早期宏观藻类以简单的浮游类 *Chuaria*、*Tawuia* 为主, 存在 *Longfengshania* 发育的潜力。而南缘淮南地区早期“淮南生物群”无 *Longfengshania*, *Chuaria-Tawuia* 个体较大, *Tawuia* 形态分异度较高, 具 I、J、C 和 U 四种形态, 可与小达尔生物群对比, 同时新元古代成冰期之前古地磁数据显示华北板块南缘(尤其是淮南地区)与劳伦古陆北缘古地理位置非常接近(Fu et al., 2015), 故早期淮南生物群可能受小达尔生物群影响; 或者龙凤山生物群向西南方向由于环境变化梯度较大或物源供给不同, 造成淮南区域生物特化。

2.2 劳伦板块宏观藻类生物群

劳伦板块青白口纪宏观藻类主要分布在北缘的北美地区。位于古劳伦大陆西北部麦肯基山(Mckenzie Mts.)地区的加拿大大小达尔生物群(Hofmann, 1985), 为新元古代早期宏观藻类生物群的代表之一, 化石产于麦肯基超群上部小达儿群的泻湖相日瓦斯蒂组页岩(Rusty shale)与下部碳酸盐岩边缘台地优格山(Rouge Mts.)组页岩中(Hofmann,

1985),小达尔群顶部玄武岩露头中的辉绿岩获取的精确锆石年龄值为 778.4 ± 1.8 Ma(2σ)和 775.10 ± 0.54 Ma(2σ),进一步限定了小达尔群的年龄值上限小于 778 Ma(Milton et al., 2017),与区域内科迪勒拉山脉北部具有同期的岩浆岩年龄值指示其为同期构造运动所致(Lecheminant and Heaman, 1989),代表 Rodinia 超大陆裂解前劳伦(北美)板块内的构造运动(Milton et al., 2017),同时小达尔群之上的基利恩(Kilian)组 $\delta^{13}\text{C}$ 数据特征指示其早于新元古代的冰期事件(Jones et al., 2010),故小达尔群为新元古代早期宏观藻类生物群;下伏的凯瑟琳(Katherine)群测得 U-Pb 年龄为 1 081 ± Ma 和 1 003 ± 4 Ma(Rainbird et al., 1994),故小达尔生物群年龄应为 1 000~778 Ma. 小达尔生物群属种丰富,特征明显,为以 *Chuaria-Tawuia-Longfengshania* 为代表的宏观藻类组合,共 3 科 7 属 12 种:*Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularis*,*Tawuiaceae* 科的 *Tawuia dalensis*,*Longfengshaniaceae* 科的 *Longfengshania stipitata*、*L. qingbaikouensis*、*L. elongata*、*L. ovalis*、*L. longipetiolata*、*L. sphaerica*、*L. dicrania*,及未定科的浮游藻类 *Beltina danai*、*Daltaenia mackenziensis*、*Morania antique*、*Tyrasotaenia* sp.. *D. mackenziensis* 为分枝细茎状藻体(图 1m),*Tyrasotaenia* 为不规则丝状藻体(图 1c). *C. circularis* 和 *T. dalensis* 最为丰富,*T. dalensis* 形态特征明显,分异度高,长轴为 1.0~8.5 mm,最长可达 15.2 cm,个体以 I、J、C 和 U 形展布,多以单体与 *C. circularis* 伴生,贯穿于整个化石层位,上部层位发现的 *Longfengshania* 化石呈团簇状(Hofmann, 1985). 化石层位总体为滨海潮上带—潮间带沉积环境,岩性以泻湖相砂泥质陆源碎屑岩沉积为主,而上下层位发育的台地边缘相白云岩说明当时沉积环境有阶段性的蒸发特征,Rainbird et al.(1996)推测其总体属于近滨泻湖环境.

加拿大维克托亚岛沙乐尔(Shaler)超群与麦肯基超群同为阿蒙森(Amundsen)超级盆地的南北两侧,两者岩石地层、年代地层格架、微生物属种、层序地层特征、及元素地球化学特征(Jones et al., 2010)皆可对比. 沙乐尔群维尼塔(Wynniatt)组 3 条剖面皆在黑色页岩(上覆灰质白云岩)顶部发现宏观藻类(Hofmann and Rainbird, 1994)共 2 科 3 属 3 种:*Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularis*,*Tawuiaceae* 科的 *Tawuia dalensis*,*Beltina danai*(未定科). 相比小达尔群,其化石丰度低,分异度减小,个体较小;*C. circularis* 长轴为 1~

3 mm,*T. dalensis* 长轴为 2~7 mm,宽为 0.9~2.8 mm. 化石表面由成岩作用形成的纹饰较多(Hofmann and Rainbird, 1994). 含化石层位沉积环境为近滨静水环境,向上伴有迅速的海退趋势及阶段蒸发(Hofmann and Rainbird, 1994).

区内同时期可对比的化石产地还包括加拿大弗兰克林山帽山(Cap Mountain)群孤陆(Lone Land)组(Samuelsson and Butterfield, 2001),加拿大班服国家地质公园海科特(Hikte)组(Gussow, 1973),美国犹他州犹他山红松(Korean pine)组(Hofmann, 1977). 宏观藻类属种简单仅有 *Chuaria circularia*,个体较小,分异度低.

从宏观藻类分布特征上看,劳伦北缘以麦肯基山地区为中心,宏观藻类向东北部弗兰克林山、维克托亚岛及西南部班服地区至犹他山地区辐射,中心以 *Chuaria-Tawuia-Longfengshania* 为代表,属种分异度高,峰值高,个体较大. 向东北地区以 *Chuaria-Tawuia* 为主,分异度和峰值降低,个体变小;而向西南地区生物辐射较弱,仅有 *Chuaria circularris*,丰度减小,底栖固着 *Longfengshania*,形态分异度较高且呈团块状出现. 化石层沉积皆以滨海静水环境为特征,阶段性发育的蒸发性岩层指示古地理位置处于低纬度地区(Evans, 2006),这与古地磁数据($1^{\circ} \sim 2^{\circ}\text{N}$, Mackenzie Mountains, 778 Ma, Park and Jefferson, 1991; $5^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{N}$, Utah Mountains, 742 ± 6 Ma, Elston et al., 1993)所反映的情况一致,表明气候温暖,符合藻类生活环境.

2.3 扬子板块宏观藻类

扬子地区早新元古代宏观藻类简单,以浮游类 *Chuaria-Tawuia* 化石组合为特征,无 *Longfengshania*(表 1). 区内在滇中昆明附近分布有 2 处化石点,产于清水沟组中部钙质泥质板岩中(1 002~933 Ma; 戴恒贵和彭玉久, 1986),包括 2 科 2 属 2 种:*Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularia*,*Tawuiaceae* 科的 *Tawuia danensis*. 个体尺寸较小,*C. circularia* 直径一般为 2~4 mm,*T. danensis* 为 I 形,最大长轴为 7 mm,短轴为 0.4~4.0 mm,形态分异度较低(戴恒贵和彭玉久, 1986).

2.4 印度板块宏观藻类

印度板块早新元古代宏观藻类以简单浮游类 *Chuaria-Tawuia* 为组合特征(表 1). Sharma and Shukla(2016)对韦德亚(Vindhyan)超群上部的沉积地层分析指出,卡奴儿(Kurnool)群/比马(Bhima)群为冰期前沉积地层,下伏的凯布尔(Kaimur)

群同位素测年数据显示其年龄值约为 1 067 Ma (Ray *et al.*, 2003), 因此卡奴儿(Kurnool)群/比马(Bhima)群可以与雷瓦(Rewa)群对比, 属于早新元古代(Sharma and Shukla, 2016), 3 个群内产出的 *Chuaria-Tawuia* 浮游宏观藻类分布于印度中部(Rai *et al.*, 1997; Sharma and Shukla, 1999)与南部页岩中(Maithy and Babu, 1996; Sharma and Shukla, 2012)(图 2). 区内化石特征无明显差异, 分异度低, 个体小, 共 2 科 2 属 2 种: *Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularia* 和 *Tawuiaceae* 科的 *Tawuia dalensis*, *Tawuia* 形态分异度较低. 中部产出的 *Chuaria* 直径为 1.0~3.7 mm, 平均 2 mm, 而 *Tawuia* 为 I 形, 长轴为 3.3~5.0 mm(Rai *et al.*, 1997); 南部产出的 *C. circularia* 直径为 1~3 mm, *T. dalensis* 为 I 形, 长轴不超过 5 mm(Sharma and Shukla, 1999). 地层沉积序列与岩性分析表明化石形成于潮间带浅水透光层中(Sharma and Shukla, 2016), 化石大部分保存完好说明水动能较弱, 即总体为滨海静水沉积环境.

2.5 海南微陆块宏观藻类

海南岛大地构造背景为海南中北部的五指山地块(龙文国等, 2005), 元古代时期其位置位于劳伦与澳大利亚之间(Li *et al.*, 1999). 其报道的 *Chuaria-Tawuia* 宏观藻类(张仁杰等, 1989)产于石碌群的第 6 层白云岩所夹的碳质泥质板岩中(Zhang *et al.*, 1992), 石碌群及其赋存的条带状铁建造中独居石 CHIME 测年数据显示石碌群的沉积时限为 1 075~880 Ma(王智琳等, 2015), 基本属于新元古代早期拉伸纪, 与化石年龄一致(841±20 Ma; Zhang *et al.*, 1992), 年代地层可与华北青白口系对比. 剖面产出化石较为丰富, 包含 2 科 2 属 2 种: *Chuariaceae* 科的 *Chuaria circularis*, *Tawuiaceae* 科的 *Tawuia dalensis*(张仁杰等, 1989). *C. circularia* 个体直径为 1~2 mm; *T. dalensis* 个体较大, 形态分异度较高, 呈 I、J、C 和 U 形, 以单体与 *C. circularia* 并存, U 形个体最大, J 和 C 形个体略小, I 形个体最小. 化石层位沉积环境为半封闭泻湖(张仁杰等, 1989).

3 青白口纪宏观藻古生物地理意义

3.1 古地理环境

华北怀来龙凤山生物群生活环境为气候温暖、水动力较弱的滨海近岸潮间至潮下带的半封闭的泻湖环境, 宏观藻类为底栖和浮游属种并存; 燕山西段京

西骆驼岭组为静水泻湖相, 以陆源碎屑岩为主, 多期沉积韵律, 反映出低水位体系域下切河谷到海侵体系域的沉积环境, 属海水缓慢上升时形成的海岸平原沉积到半封闭的泻湖环境, 底栖和浮游宏观藻类并存, 古植物特征亦反映出海水较浅、光照充足的特征(唐烽和高林志, 1999); 蓼县地区水体逐渐加深, 以小个体浮游宏观藻类属种为主. 燕山东段兴隆地区受“蓟县抬升”的影响, 水体较浅, 底栖和浮游宏观藻类并存, 而向宽城丰润地区水体变深, 宏观藻类仅有浮游属种, 个体较小; 辽南地区钓鱼台组、南芬组自下而上为滨海—浅海—近滨盆地相陆源沉积, 化石层位皆属水动能较弱的滨海沉积环境(唐烽和高林志, 1999), 宏观藻类仅有浮游属种; 淮南刘老碑组下部含化石层为缺氧潮坪的潮下带静水沉积相(唐烽和高林志, 1999), 宏观藻类仅有浮游属种, 个体较大. 劳伦板块北缘化石层沉积皆以近滨泻湖静水环境为特征, 发育的微生物席指示水体较浅(Samuelsson and Butterfield, 2001), 以中部底栖和浮游宏观藻类并存的麦肯基山地区为中心, 向东北部维克托亚地区和西部班服法兰克林山地区水体略变深, 伴有迅速的海进趋势及阶段性蒸发环境(Hofmann and Rainbird, 1994), 宏观藻类仅有浮游属种, 个体较小. 扬子板块云南地区清水河组为潮坪一半封闭泻湖相, 上部含化石泥质板岩与硅质岩互层反映水深阶段性快速变化的特征, 水平层理发育指示水动能较弱, 为半封闭静水泻湖沉积环境(戴恒贵和彭玉久, 1986), 宏观藻类仅有浮游属种, 个体较小. 海南岛含化石层沉积相为海湾泻湖相, 水动力较弱(张仁杰等, 1989), 宏观藻类仅有浮游属种. 印度中南部化石层位沉积环境总体为滨海静水沉积环境(Sharma and Shukla, 2016), 宏观藻类仅有浮游属种.

古地磁数据显示早新元古代劳伦大陆北缘(Wingate *et al.*, 2002; Weil *et al.*, 2004)、华北板块(张惠民, 1995; Zhang *et al.*, 2006; Fu *et al.*, 2015)、扬子板块(Evans *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2006)、印度板块(Radhakrishna, 1996)基本位于赤道附近的低纬度地区, 应为热带温热气候, 这与早期藻类生存环境(杨瑞东等, 2002)一致.

综上可知, 青白口纪宏观藻类基本分布于赤道附近低纬度地区温暖气候的滨海半封闭泻湖静水环境中.

3.2 古生物地理分区

结合上文讨论结果与古生物地理区系划分理论

(殷鸿福, 1988), 笔者将全球早新元古代宏观藻类划分为一个低纬度地区的宏观藻类域(realm), 以浮游 *Chuaria-Tawuia* 和底栖固着 *Longfengshania* 为组合特征, 基本分布在华北板块、劳伦古陆北缘、扬子板块、印度古陆中南部及海南微陆块赤道附近滨海温暖静水环境中。从生物形态上看, 华北板块和劳伦古陆北缘以 *Chuaria-Tawuia-Longfengshania* 生物组合为特征, 特征属 *Longfengshania* 具有 7 个相同种(表 1), *Tawuia dalensis* 有 I、J、C 和 U 四种形态; 从古生物地理角度看, 二者宏观藻类具有相同的生物亚型, 即基本以中心浮游和底栖宏观藻类亚型向周围仅有浮游宏观藻类亚型变化; 海南微陆块为浮游类 *Chuaria-Tawuia* 属种, *T. dalensis* 包含 I、J、C 和 U 四种形态, 属过渡型生物相; 而扬子板块与印度古陆以浮游类 *Chuaria-Tawuia* 生物相(表 1)为主, 只有 I 形 *T. dalensis* 发育。此外, 在扬子—印度区域内未见生物相的变化, 即无亚型的分化。生物古地理亚型往往能够反映一定的大地构造性质(殷鸿福, 1988), 从这一点上看, 华北—劳伦与扬子—印度两个区域内存在古构造性质差异。数学统计方法在古生物地理区系中的应用能直观量化生物地理之间的亲属关系, Otc 系数($= C / \sqrt{N_1 N_2}$, 其中 C 为两个比较对象共同特征属, N_1, N_2 为比较对象的各自特征数)能够反映不同区域生物地理间亲疏关系, 在古生物地理区系划分中应用最为广泛(殷洪福, 1988), Otc 系数越大则二者古地理关系越亲密。通过计算, 华北与劳伦、印度的 Otc 系数分别为 73%、32%, 扬子与劳伦、印度的 Otc 系数分别为 35%、92%, 表明在古地理上华北与劳伦古陆更亲密而扬子与印度联系更紧密。

华北—劳伦、扬子—印度生物相主要受古纬度及地理隔离的控制。从所含化石地层的沉积相上看, 华北、劳伦与印度板块含化石层沉积岩皆为微细纹层泥质页岩相, 扬子板块为板岩相但岩性基本也为泥质, 四者皆反映为滨海静水泻湖沉积环境, 故沉积相控制生物相的可能性不大; 在生物演化早期生物的分化、分异度较低, 该时期生物没有能力进行远距离的迁徙, 主要在起源地逐渐向外扩散的方式为主, 因此早期生物分区主要受古纬度(气候)以及古地理隔离的控制(杨瑞东等, 2002)。继埃尔塞维尔期(1 250~1 190 Ma)造山运动后北美与南美地体间碰撞—格林威尔造山运动(1 100~900 Ma; 周金城等, 2008)使南半球低纬度地区劳伦古陆的中西部产生一系列造山带, 同时根据 Rodinia 时期古地理分布(Li et al.,

2013), 笔者推测在北半球 Rodinia 超级大陆中部存在一条半开放的深海海槽, 两者共同构成了 Rodinia 超级大陆中央隔离带(图 2), 使东部与西部产生了地理隔离, 使浮游 *Chuariaeae*、*Tawuiaceae* 能够在低纬度地区漂移, 而底栖固着 *Longfengshaniaceae* 则不行, 进而造成生物相的差异。

综上所述, 赤道附近低纬度地区的宏观藻类域可进一步被划分为华北—劳伦(*Chuaria-Tawuia-Longfengshania*)区和扬子—印度(*Chuaria-Tawuia*)区, 华北—劳伦区内生物特征亦有差异: 华北板块以龙凤山生物群为代表, *Longfengshania* 以单体发育为特征, 属种丰富, 叶状体形态分异度较强, 有强烈伸长的趋势, 出现 *Paralongfengshania* 及形态更复杂的底栖 *Paralaminaria xinglongensis*, *Tawuia* 形态简单、个体较小, 据此划分为一个华北宏观藻类省; 而劳伦板块北缘以小达儿群为代表, *Longfengshania* 以丛状出现, 数量较少, 叶状体分异性较华北低, 无强烈伸长个体, *Tawuia* 特征明显, 形态分异度高, 可划分为一个劳伦北缘宏观藻类省。根据生物省内生物特征区域变化(见 2.1、2.2 节), 华北宏观藻类省可以分为燕山底栖—浮游生物区和辽南浮游生物区, 淮南地区早期“淮南生物群”生物特化现象明显, 可划分为淮南浮游生物区, 而劳伦北缘宏观藻类省划分为以麦肯基山为中心的小达尔底栖—浮游生物区和周围维克托—犹他浮游生物区。比较而言, 扬子—印度(*Chuaria-Tawuia*)区宏观藻类以浮游为主, 区内基本以简单的小型浮游 *Chuaria-Tawuia* 为特征, 区域内无变换, 不能进一步划分。劳伦古陆(*Chuaria-Tawuia-Longfengshania*)区与扬子—印度(*Chuaria-Tawuia*)区生物地理区系的差异主要为地理隔离所致。海南微陆块为过渡型浮游生物相。

4 青白口纪宏观藻类古板块意义

Rodinia 超级大陆聚合形成时间为 1 100~900 Ma(Li et al., 2008), 而其裂解时间不会早于 720 Ma(Li et al., 2013), 故青白口纪为 Rodinia 聚合期。近年来国内外学者对新元古代早期华北与扬子板块在 Rodinia 超大陆中的位置研究主要集中在构造地质学(Wang et al., 2011; Du et al., 2014)、精确的古地磁学(Zhang et al., 2006, 2013; Li et al., 2008; Fu et al., 2015)等方面, 而古生物地理区系在古板块重建中罕有应用。

高精度古地磁数据显示,华北板块早新元古代位于 Rodinia 超级大陆东缘赤道附近低纬度地区(Zhang et al., 2006, 2013; Zhou et al., 2006; Li et al., 2008; Fu et al., 2015),但具体纬向分布主要有 2 种争论,即更靠近西伯利亚(Li et al., 1996, 2008)还是更靠近劳伦古陆(Zhang et al., 2006; Fu et al., 2015).前者主要依据沉积地层对比(Li et al., 1996)及古地磁数据(Wu et al., 2005),而后者则主要根据华北板块在 Rodinia 时期前后(1 200~700 Ma)具有与劳伦板块相同的视极移轨迹(Elston et al., 1993)直至冈瓦那大陆初期(615 Ma)才停止(Zhang et al., 2006),故两者联系更紧密.后者同时受到两板块从沉积地层格架中反映出

的同步岩浆活动与构造运动方面的证据支持(Elston et al., 1993; 张惠民, 1995);加拿大北部阿蒙森盆地普遍发育的铁镁质岩浆岩(779 Ma; Jefferson and Parrish, 1989)及下部陆河地区十五英里群与麦肯基山凯瑟琳群的底界的不整合面(1 077 Ma, Rainbird et al., 1994; 1 003 Ma, Rainbird et al., 1996)所代表的地质事件(the Corn Creek Orogeny, 1 033~750 Ma; Thorkelson et al., 2005),与华北芹峪运动($\sim 1 000$ Ma)及蔚县运动(~ 800 Ma)可作对比.结合此次早新元古代宏观藻类古生物地理区系的划分结果,华北与劳伦北缘以发育底栖固着 *Longfengshania* 植物群为共同特征,且有相同的区域变化规律,这一特征在其他板块

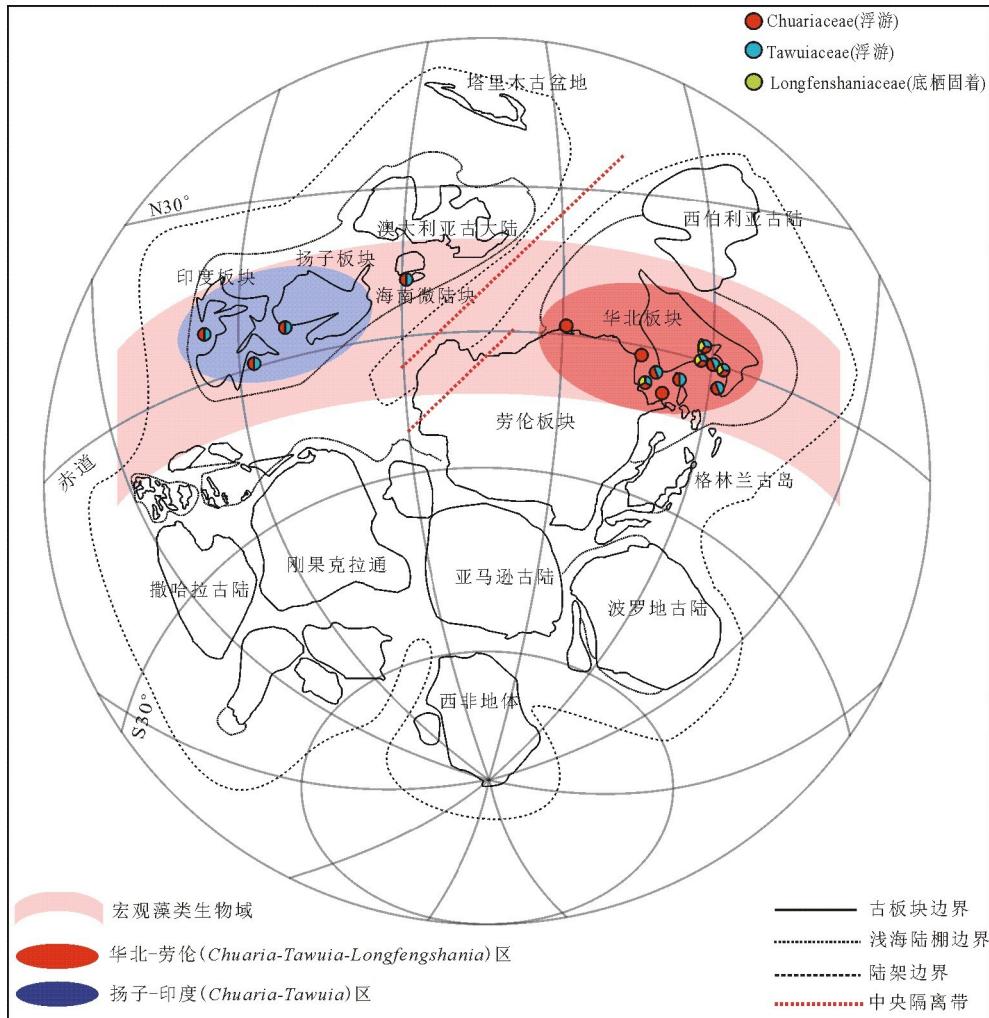


图 2 青白口纪宏观藻类古生物地理区系划分与 Rodinia 超大陆板块分布

Fig.2 The distributions of macroalgae and paleoplates of Rodinia supercontinents in Tonian

据 Li et al.(1999, 2008)修改.化石点从右至左依次代表:兴隆(Du and Tian, 1985);蔚县(朱士兴等, 1994);怀来龙凤山(Du and Tian, 1985);辽宁复州、金县地区(林蔚兴和邢裕盛, 1984; 洪作民等, 1991);北京西山地区芹峪、昌平、青白口剖面(萧宗正, 1990; 唐峰, 1995);加拿大维克托亚岛(Hofmann and Rainbird, 1994);加拿大弗兰克林山(Samuelsson and Butterfield, 2001);安徽(Duan, 1982; 符俊辉, 1989);加拿大麦肯基山(Hofmann and Altken, 1979; Hofmann, 1985);加拿大班服地区(Gussow, 1973);美国犹他州犹他山(Hofmann, 1977);海南岛(张仁杰等, 1989);云南昆明地区(戴恒贵和彭玉久, 1986);印度南部(Maithy and Babu, 1996; Sharma and Shukla, 2012);印度中部(Rai et al., 1997)

上不存在。因此,笔者认为华北板块与劳伦古陆北缘在早新元古代古板块位置非常接近。

早新元古代扬子板块在 Rodinia 超级大陆中的位置,即位于超大陆的西缘还是在超大陆的中心,近年来有所争论,其焦点在于新元古代(860~745 Ma)扬子板块西缘一系列岩浆岩的来源。学者们结合锆石和元素地球化学等数据认为其具有双峰式火山岩的特征(Li *et al.*, 1999, 2003, 2010, 2013; Wang *et al.*, 2011),应源于地幔,这一岩浆事件代表来自 Rodinia 超级大陆中心的内部裂解动力,结合“Missing-link”理论(Li *et al.*, 1995)认为新元古代早期扬子板块在 Rodinia 超级大陆的中心(Li *et al.*, 2008),Rodinia 超大陆裂解后扬子板块向超大陆轮廓的西缘进行漂移至新元古代晚期与印度板块碰撞拼合,形成 Gondwana 超级大陆的一部分,但这一观点与后期构造事件所反映的结果相矛盾,即伊迪卡拉纪与寒武纪早期在扬子板块上未发现构造岩浆事件;另一种观点是这些岩浆岩代表 Rodinia 超级大陆边缘的陆壳受到洋壳俯冲作用(Zhou *et al.*, 2002, 2006; Wang *et al.*, 2006; Du *et al.*, 2014),结合此时期内普遍认同的印度板块位置和古地磁证据,扬子板块在早新元古代应位于 Rodinia 超级大陆的西缘,这一结论同时得到了沉积地层学(Jiang *et al.*, 2003)、元素地球化学(Du *et al.*, 2014)、微古生物学(唐烽等, 2009a)、碎屑物源对比(Zhou *et al.*, 2006)、年代地层学(Wang *et al.*, 2006)、古地磁学(Radhakrishna, 1996; Li *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2013)等研究结果的支持,但仍然存在问题,比如如何准确限定沉积岩的沉积时代、在 Rodinia 时期是否存在物源的变化、以及特征性地球化学元素是否广泛分布等。宏观藻类古生物地理区系的划分结果显示扬子—印度(*Chuarria-Tawuia*)区基本为小型浮游类生物,这与劳伦古陆(*Chuarria-Tawuia-Longfengshania*)区底栖固着及较大浮游生物相具有明显差异,因此笔者认为扬子板块与印度古陆早新元古代相邻,位于 Rodinia 超级大陆的西缘(图 2)。

4 结论

根据青白口纪宏观藻类生物因子在新元古代早期古大陆的分布,笔者将赤道附近低纬度地区划分为一个宏观藻类生物域,进一步划分为华北—劳伦(*Chuarria-Tawuia-Longfengshania*)区和扬子—印度

(*Chuarria-Tawuia*)区;根据生物特征进一步划分为华北宏观藻类省和劳伦宏观藻类省,前者又可分为中心燕山底栖—浮游生物区和边缘的淮南浮游生物区、辽南浮游生物区,后者可分为中心的麦肯基底栖—浮游生物区和周围维克托亚—犹他浮游生物区,而扬子—印度(*Chuarria-Tawuia*)区内化石分布无明显变化。根据古生物地理区系的划分,结合以往古地磁、构造运动等方面的研究结果,笔者认为此时期内华北板块与劳伦古陆西北缘相邻,位于 Rodinia 超级大陆东缘,古地理环境非常相似;而扬子板块与印度古陆相邻,位于 Rodinia 超级大陆的西缘(图 2)。

References

- Amard, B., 1992. Ultrastructure of *Chuarria* (Walcott) Vidal and Ford (Acritarcha) from the Late Proterozoic Pendjari Formation, Benin and Burkina-Faso, West Africa. *Precambrian Research*, 57(1–2): 121–133. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90096-7](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90096-7)
- Butterfield, N.J., 2001. Paleobiology of the Late Mesoproterozoic (ca. 1 200 Ma) Hunting Formation, Somerset Island, Arctic Canada. *Precambrian Research*, 111(1–4): 235–256. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(01\)00162-0](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(01)00162-0)
- Chen, M.E., Zheng, W.W., 1986. On the Pre-Ediacaran Huanian Biota. *Chinese Journal of Geology*, 21(3): 221–231 (in Chinese with English abstract).
- Dai, H.G., Peng, Y.J., 1986. Stratigraphic Classification, Biological Characteristics and Age, Late Presinian in Yunnan. *Precambrian Geology*, 3: 115–121 (in Chinese).
- Damassa, S.P., Knoll, A.H., 1986. Micropalaeontology of the Late Proterozoic Arcoona Quartzite Member of the Tent Hill Formation, Stuart Shelf, South Australia. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 10(4): 417–430. <https://doi.org/10.1080/03115518608619150>
- Du, L.L., Guo, J.H., Nutman, A.P., et al., 2014. Implications for Rodinia Reconstructions for the Initiation of Neoproterozoic Subduction at ~860 Ma on the Western Margin of the Yangtze Block: Evidence from the Guandaoshan Pluton. *Lithos*, 196–197: 67–82. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.002>
- Du, R.L., Tian, L.F., 1985. Algal Macrofossils from the Qingbaikou System in the Yanshan Range of North China. *Precambrian Research*, 29(1–3): 5–14. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(85\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0301-9268(85)90055-5)
- Du, R.L., Wang, Q.Z., Tian, L.F., 1995. Catalogue of Algal Megafossils from the Proterozoic of China. *Precambrian*

- Precambrian Research*, 73: 291–298. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)00083-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)00083-4)
- Duan, C. H., 1982. Late Precambrian Algal Megafossils Chuaria and Tawuiain Some Areas of Eastern China. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 6(1): 57–68. <https://doi.org/10.1080/03115518208565420>
- Dutta, S., Steiner, M., Banerjee, S., et al., 2006. Chuaria Circularis from the Early Mesoproterozoic Suket Shale, Vindhyan Supergroup, India: Insights from Light and Electron Microscopy and Pyrolysis-Gas Chromatography. *Journal of Earth System Science*, 115(1): 99–112. <https://doi.org/10.1007/bf02703028>
- Elston, D. P., Link, P. K., Winston, D., et al., 1993. Correlations of Middle and Late Proterozoic Successions. In: Reed, J. C., et al., eds., *Precambrian: Conterminous U.S.*. Geological Society of America, Boulder.
- Evans, D. A. D., 2006. Proterozoic Low Orbital Obliquity and Axial-Dipolar Geomagnetic Field from Evaporite Palaeolatitudes. *Nature*, 444: 51–55. <https://doi.org/10.1038/nature05203>
- Evans, D. A. D., Li, Z. X., Kirschvink, J. L., et al., 2000. A High-Quality Mid-Neoproterozoic Paleomagnetic Pole from South China, with Implications for Ice Ages and the Breakup Configuration of Rodinia. *Precambrian Research*, 100(1–3): 313–334. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(99\)00079-0](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(99)00079-0)
- Ford, T. D., Breed, W. J., 1973. The Problematic Precambrian Fossil Chuaria. *Palaeontology*, 16(3): 535–550.
- Fu, J. H., 1989. Assemblage of Huainan Biota and Its Characteristics. *Acta Palaeontologica Sinica*, 28(5): 642–652 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. M., Zhang, S. H., Li, H. Y., et al., 2015. New Paleomagnetic Results from the Huaibei Group and Neoproterozoic Mafic Sills in the North China Craton and Their Paleogeographic Implications. *Precambrian Research*, 269: 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.013>
- Gussow, W. C., 1973. Chuaria sp. cf. C. Circularis Walcott from the Precambrian Hector Formation, Banff National Park, Alberta, Canada. *Journal of Paleontology*, 47(6): 1108–1112.
- Hofmann, H. J., 1977. The Problematic Fossil Chuaria from the Late Precambrian Uinta Mountain Group, Utah. *Precambrian Research*, 4(1): 1–11. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(77\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0301-9268(77)90009-2)
- Hofmann, H. J., 1985. The Mid-Proterozoic Little Dal Macrobiota Mackenzie Mountains, North-West Canada. *Palaeontology*, 28(2): 331–354.
- Hofmann, H. J., Altken, J. D., 1979. Precambrian Biota from the Little Dal Group, Mackenzie Mountains, Northwestern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(1): 150–166. <https://doi.org/10.1139/e79-014>
- Hofmann, H. J., Raintbird, R. H., 1994. Carbonaceous Megafossils from the Neoproterozoic Shaler Supergroup of Arctic Canada. *Palaeontology*, 37(4): 721–732.
- Hoffman, P. F., 1991. Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside-Out? *Science*, 252: 1409–1412. <https://doi.org/10.1126/science.252.5011.1409>
- Hong, Z. M., Yang, Y. J., Huang, Z. F., et al., 1991. Macrofossil Sequence of the Late Precambrian from the Southern Liaodong Peninsula. *Liaoning Geology*, (3): 219–236 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B. C., Zhou, Y. X., Zhu, R. X., 2008. Discussions on Phanerozoic Evolution and Formation of Continental China, Based on Paleomagnetic Studies. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 348–359 (in Chinese with English abstract).
- Ivantsov, A. Y., Gritsenko, V. P., Konstantinenko, L. I., et al., 2014. Revision of the Problematic Vendian Macrofossil Beltanelliformis (=Beltanelloides, Nemiana). *Paleontological Journal*, 48(13): 1415–1440. <https://doi.org/10.1134/s0031030114130036>
- Jefferson, C. W., Parrish, R. R., 1989. Late Proterozoic Stratigraphy, U-Pb Zircon Ages, and Rift Tectonics, Mackenzie Mountains, Northwestern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(9): 1784–1801. <https://doi.org/10.1139/e89-151>
- Jiang, G. Q., Sohl, L. E., Christie-Blick, N., 2003. Neoproterozoic Stratigraphic Comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze Block (South China): Paleogeographic Implications. *Geology*, 31(10): 917–920. <https://doi.org/10.1130/g19790.1>
- Jones, D. S., Maloof, A. C., Hurtgen, M. T., et al., 2010. Regional and Global Chemostratigraphic Correlation of the Early Neoproterozoic Shaler Supergroup, Victoria Island, Northwestern Canada. *Precambrian Research*, 181(1–4): 43–63. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.05.012>
- Knoll, A. H., 1982. Microfossil-Based Biostratigraphy of the Precambrian Hecla Hoek Sequence, Nordaustlandet, Svalbard. *Geological Magazine*, 119(3): 269–279. <https://doi.org/10.1017/s001675680002608x>
- Kumar, S., 2001. Mesoproterozoic Megafossil Chuaria-Tawuiia Association May Represent Parts of a Multicellular Plant, Vindhyan Supergroup, Central India. *Precambrian Research*, 106(3–4): 187–211. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(00\)00093-0](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(00)00093-0)

- LeCheminant, A.N., Heaman, L.M., 1989. Mackenzie Igneous Events, Canada: Middle Proterozoic Hotspot Magmatism Associated with Ocean Opening. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(1–2): 38–48. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(89\)90122-2](https://doi.org/10.1016/0012-821x(89)90122-2)
- Li, X.H., Li, Z.X., Ge, W.C., 2003. Neoproterozoic Granitoids in South China: Crustal Melting above a Mantle Plume at ca. 825 Ma? *Precambrian Research*, 122(1–4): 45–83. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00207-3](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00207-3)
- Li, X.H., Zhu, W.G., Zhong, H., et al., 2010. The Tongde Picritic Dikes in the Western Yangtze Block: Evidence for ca. 800 Ma Mantle Plume Magmatism in South China during the Breakup of Rodinia. *The Journal of Geology*, 118(5): 509–522. <https://doi.org/10.1086/655113>
- Li, Z.X., Bogdanova, S.V., Collins, A.S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research*, 160(1–2): 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Li, Z.X., Evans, D.A.D., Halverson, G.P., 2013. Neoproterozoic Glaciations in a Revised Global Palaeogeography from the Breakup of Rodinia to the Assembly of Gondwanaland. *Sedimentary Geology*, 294: 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.05.016>
- Li, Z.X., Evans, D.A.D., Zhang, S., 2004. A 90° Spin on Rodinia: Possible Causal Links between the Neoproterozoic Supercontinent, Superplume, True Polar Wander and Low-Latitude Glaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(3–4): 409–421. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00064-0](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00064-0)
- Li, Z.X., Li, X.H., Kinny, P.D., et al., 1999. The Breakup of Rodinia: Did It Start with a Mantle Plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171–181. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(99\)00240-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(99)00240-x)
- Li, Z.X., Zhang, L.H., Powell, C.M., 1995. South China in Rodinia: Part of the Missing Link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 23(5): 407–410. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<407:scirpo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<407:scirpo>2.3.co;2)
- Li, Z.X., Zhang, L.H., Powell, C.M., 1996. Positions of the East Asian Cratons in the Neoproterozoic Supercontinent Rodinia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 593–604. <https://doi.org/10.1080/08120099608728281>
- Lin, W.X., Xing, Y.S., 1984. Study on the Sinian Metazoan Fossils in Liaonan Group. *Bull. Shenyang Ins. Getol. Min ReS.*, *Chinese Acad. Geol. Sci.*, 10: 51–67 (in Chinese).
- Long, W.G., Ding, S.J., Ma, D.Q., et al., 2005. Formation and Evolution of the Precambrian Basement in Hainan Is- land. *Earth Science*, 30(4): 421–429 (in Chinese with English abstract).
- Maithy, P.K., Babu, R., 1996. Carbonaceous Macrofossils and Organic-Walled Microfossils from the Halkal Formation, Bhima Group, Karnataka with Remarks on Age. *Palaeobotanist*, 45: 1–6.
- Milton, J.E., Hickey, K.A., Gleeson, S.A., et al., 2017. New U-Pb Constraints on the Age of the Little Dal Basalts and Gunbarrel-Related Volcanism in Rodinia. *Precambrian Research*, 296: 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.04.030>
- Niu, Z.J., Wu, J., 2015. Palaeobiogeography of Permian Fusulimid in Southern Qinghai. *Earth Science*, 40(2): 346–356 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.027>
- Park, J.K., Jefferson, C.W., 1991. Magnetic and Tectonic History of the Late Proterozoic Upper Little Dal and Coates Lake Groups of Northwestern Canada. *Precambrian Research*, 52(1–2): 1–35. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(91\)90011-x](https://doi.org/10.1016/0301-9268(91)90011-x)
- Planavsky, N.J., Tarhan, L.G., Bellefroid, E., et al., 2015. Late Proterozoic Transitions in Climate, Oxygen, and Tectonics, and the Rise of Complex Life. In: Polly, P.D., Head, J.J., Fox, D.L., eds., *Earth-Life Transitions: Paleobiology in the Context of Earth System Evolution*. Yale University Press, New Haven.
- Porter, S.M., 2006. The Proterozoic Fossil Record of Heterotrophic Eukaryotes. *Neoproterozoic Geobiology and Paleobiology*, 1–21. https://doi.org/10.1007/1-4020-5202-2_1
- Radhakrishna, T., 1996. Late Precambrian (850–800 Ma) Palaeomagnetic Pole for the South Indian Shield from the Harohalli Alkaline Dykes: Geotectonic Implications for Gondwana Reconstructions. *Precambrian Research*, 80(1–2): 77–87. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(96\)00006-x](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(96)00006-x)
- Rai, V., Shukla, M., Gautam, R., et al., 1997. Discovery of Carbonaceous Megafossils (*Chuaria-Tawania Assemblage*) from the Neoproterozoic Vindhyan Succession (Rewa Group), India. *Currentence*, 73(9): 783–788.
- Rainbird, R.H., Jefferson, C.W., Young, G.M., 1996. The Early Neoproterozoic Sedimentary Succession B of Northwestern Laurentia: Correlations and Paleogeographic Significance. *Geological Society of America Bulletin*, 108(4): 454–470. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1996\)108<0454:tenssb>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1996)108<0454:tenssb>2.3.co;2)
- Rainbird, R.H., Mcnicoll, V.J., Heaman, L.M., 1994. Detrital Zircon Studies of Neoproterozoic Quartzarenites from

- Northwestern Canada: Additional Support for an Extensive River System Originating from Grenville Orogen. Eighth International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology, Berkeley.
- Ray, J.S., Veizer, J., Davis, W.J., 2003. C, O, Sr and Pb Isotope Systematics of Carbonate Sequences of the Vindhyan Supergroup, India: Age, Diagenesis, Correlations and Implications for Global Events. *Precambrian Research*, 121(1–2): 103–140. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00223-1](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00223-1)
- Samuelsson, J., Butterfield, N.J., 2001. Neoproterozoic Fossils from the Franklin Mountains, Northwestern Canada: Stratigraphic and Palaeobiological Implications. *Precambrian Research*, 107(3–4): 235–251. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(00\)00142-x](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(00)00142-x)
- Schopf, J.W., 1994. New Evidence of the Antiquity of Life. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 24(2–4): 263–282. <https://doi.org/10.1007/BF02627945>.
- Sharma, M., Shukla, Y., 1999. Carbonaceous Megaremain from the Neoproterozoic Owl Shales Formation of the Kurnool Group, Andhra Pradesh, India. *Current Science*, 76(9): 1247–1251.
- Sharma, M., Shukla, Y., 2012. Megascopic Carbonaceous Compression Fossils from the Neoproterozoic Bhima Basin, Karnataka, South India. *Geological Society, London, Special Publications*, 366(1): 277–293. <https://doi.org/10.1144/sp366.5>
- Sharma, M., Shukla, Y., 2016. The Palaeobiological Remains of the Owl Shale, Kurnool Basin: A Discussion on the Age of the Basin. *Journal of the Palaeontological Society of India*, 61(2): 175–187.
- Sun, S.F., Zhu, S.X., Huang, X.G., et al., 2004. Discovery of Parachuaria from the Chuanlinggou Formation of the Changcheng System in the Yanshan Region and Its Significance. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 721–725 (in Chinese with English abstract).
- Tang, F., 1995. Macroalgal Fossil of Changlongshan Stage in Beijing Region and Their Significance. *Professional Papers of Stratigraphy and Palaeontology*, 26: 24–34 (in Chinese with English abstract).
- Tang, F., Gao, L.Z., 1999. The Biofacies of the Qingbaikouan Period, Neoproterozoic, in Beijing Area and Its Neighboring Areas. *Geological Review*, 45(1): 50–58 (in Chinese with English abstract).
- Tang, F., Gao, L.Z., Wang, Z.Q., 2009a. Palaeogeography and Paleoenvironment of the Ediacaran (Sinian) Macrofossil Biota in South China. *Journal of Palaeogeography*, 11(5): 525–533 (in Chinese with English abstract).
- Tang, F., Yin, C.Y., Gao, L.Z., et al., 2009b. Macrofossil Records of the Neoproterozoic in the Eastern of North China Craton: An Implement of Neoproterozoic Biostratigraphy. *Geological Review*, 55(3): 305–317 (in Chinese with English abstract).
- Thorkelson, D.J., Abbott, J.G., Mortensen, J.K., et al., 2005. Early and Middle Proterozoic Evolution of Yukon, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42(6): 1045–1071. <https://doi.org/10.1139/e04-075>
- Walcott, C.D., 1899. Precambrian Fossiliferous Formations. *Geology*, 10: 199–244. <https://doi.org/10.1130/gsab-10-199>
- Wang, X.C., Li, Z.X., Li, X.H., et al., 2011. Geochemical and Hf-Nd Isotope Data of Nanhua Rift Sedimentary and Volcaniclastic Rocks Indicate a Neoproterozoic Continental Flood Basalt Provenance. *Lithos*, 127(3–4): 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.020>
- Wang, X.L., Zhou, J.C., Qiu, J.S., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Neoproterozoic Igneous Rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 145(1–2): 111–130. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.014>
- Wang, Z.L., Xu, D.R., Monika, A.K., et al., 2015. Genesis of and CHIME Dating on Monazite in the Shilu Iron Ore Deposit, Hainan Province of South China, and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 200–216 (in Chinese with English abstract).
- Weil, A.B., Geissman, J.W., van der Voo, R., 2004. Paleomagnetism of the Neoproterozoic Chuar Group, Grand Canyon Supergroup, Arizona: Implications for Laurentia's Neoproterozoic APWP and Rodinia Break-Up. *Precambrian Research*, 129(1–2): 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.09.016>
- Wingate, M.T.D., Pisarevsky, S.A., Evans, D.A.D., 2002. Rodinia Connections between Australia and Laurentia: No SWEAT, No AUSWUS? *Terra Nova*, 14(2): 121–128. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00401.x>
- Wu, H.C., Zhang, S.H., Li, Z.X., et al., 2005. New Paleomagnetic Results from the Yangzhuang Formation of the Jixian System, North China, and Tectonic Implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(14): 1483–1489. <https://doi.org/10.1360/982005-809>
- Vidal, G., Moczydlowska, M., Rudavskaya, V., 1993. Biostratigraphical Implications of a *Chuaria-Tawuia* Assemblage and Associated Acritharchs from the Neoproterozoic of Yakutia. *Palaeontology*, 36(2): 387–402.
- Xiao, S.H., Shen, B., Tang, Q., et al., 2014. Biostratigraphic

- and Chemostratigraphic Constraints on the Age of Early Neoproterozoic Carbonate Successions in North China. *Precambrian Research*, 246: 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.03.004>
- Xiao, S. H., Yuan, X. L., Steiner, M., et al., 2002. Macroscopic Carbonaceous Compressions in a Terminal Proterozoic Shale: A Systematic Reassessment of the Miaohe Biota, South China. *Journal of Paleontology*, 76(2): 347–376. [https://doi.org/10.1666/0022-3360\(2002\)076<0347:mcciat>2.0.co;2](https://doi.org/10.1666/0022-3360(2002)076<0347:mcciat>2.0.co;2)
- Xiao, Z. Z., 1990. Discovery of Macroscopic Algae-Chuarids on West Hills near Beijing City. *Geological Science*, 25(4): 403–407 (in Chinese with English abstract).
- Xing, Y. S., Ding, Q. X., Luo, H. L., 1982. Biotic Characteristics of the Sinian-Cambrian Boundary Beds in China and the Boundary Problems. *Precambrian Research*, 17(2): 77–85. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(82\)90047-x](https://doi.org/10.1016/0301-9268(82)90047-x)
- Xu, Z. L., 2002. The Occurrence of Longfengshania in the Early Cambrian from Haikou, Yunnan, China. *Acta Botanica Sinica*, 44(10): 1250–1254.
- Yang, D. B., Xu, W. L., Xu, Y. G., et al., 2012. U-Pb Ages and Hf Isotope Data from Detrital Zircons in the Neoproterozoic Sandstones of Northern Jiangsu and Southern Liaoning Provinces, China: Implications for the Late Precambrian Evolution of the Southeastern North China Craton. *Precambrian Research*, 216–219: 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.07.002>
- Yang, R. D., Mao, J. R., Zhang, W. H., et al., 2002. Study on Global Distribution of Algae Biogeographic Biota in Early and Middle Cambrian. *Journal of Palaeogeography*, 4(2): 12–18 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1505.2002.02.002>
- Yin, H. F., 1988. Chinese Biogeography. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, H. M., 1995. China Precambrian Paleomagnetic Data List. *Acta Geoscientica Sinica*, (4): 441–448 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. J., Feng, S. N., Xu, G. H., et al., 1989. The Discovery and Significance of *Chuaria-Tawuia* Fauna in the Shilu Group, Hainan Island. *Science China Chemistry*, (3): 304–311 (in Chinese).
- Zhang, R. J., Ma, G. G., Feng, S. N., et al., 1992. Sm-Nd Age of the Shilu Iron Ore Deposits on Hainan Island and Its Significance. *Chinese Journal of Geology*, (1): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Evans, D. A. D., Li, H. Y., et al., 2013. Paleomagnetism of the Late Cryogenian Nantuo Formation and Paleogeographic Implications for the South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.11.022>
- Zhang, S. H., Li, Z. X., Wu, H. C., 2006. New Precambrian Palaeomagnetic Constraints on the Position of the North China Block in Rodinia. *Precambrian Research*, 144(3–4): 213–238. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.007>
- Zhou, J. C., Wang, X. L., Qiu, J. S., 2008. Is the Jiangnan Orogenic Belt a Grenvillian Orogenic Belt: Some Problems about the Precambrian Geology of South China. *Geological Journal of China Universities*, 14(1): 64–72 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. F., Kennedy, A. K., Sun, M., et al., 2002. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, 110(5): 611–618. <https://doi.org/10.1086/341762>
- Zhou, M. F., Ma, Y., Yan, D., et al., 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic Arc Assemblage in the Western Margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144(1–2): 19–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.002>
- Zhu, S. X., Xing, Y. S., Zhang, P. Y., et al., 1994. The Biostratigraphic Sequence of North China Platform in Middle-Upper Proterozoic. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈孟羲, 郑文武, 1986. 先伊迪卡拉期的淮南生物群. 地质科学, 21(3): 221–231.
- 戴恒贵, 彭玉久, 1986. 云南晚前震旦纪地层划分、生物特征及年龄讨论. 前寒武地质, 3: 115–121.
- 符俊辉, 1989. 淮南生物群的组合面貌及其特征. 古生物学报, 28(5): 642–652.
- 洪作民, 杨雅君, 黄镇福, 等, 1991. 辽东半岛南部晚先寒武纪宏体生物序列. 辽宁地质, (3): 219–236.
- 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥, 2008. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程. 地学前缘, 15(3): 348–359.
- 林蔚兴, 邢裕盛, 1984. 辽东半岛南部震旦纪辽南群后生动物化石的研究. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 10: 51–67.
- 龙文国, 丁式江, 马大铨, 等, 2005. 海南岛前寒武纪基底组成及演化. 地球科学, 30(4): 421–429.
- 牛志军, 吴俊, 2015. 青海南部二叠纪(筵)类生物古地理区系. 地球科学, 40(2): 346–356. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2015.027>
- 孙淑芬, 朱士兴, 黄学光, 等, 2004. 燕山长城系串岭沟组 *Parachuarria* 化石的发现及其意义. 地质学报, 78(6):

721—725.

唐烽,1995.北京地区青白口纪长龙山期宏观藻类的新发现.地层古生物论文集,26:24—34.

唐烽,高林志,1999.北京及邻区青白口纪化石生物相研究.地质论评,45(1):50—58.

唐烽,高林志,王自强,2009a.华南伊迪卡拉纪宏体生物群的古地理分布及意义.古地理学报,11(5):524—533.

唐烽,尹崇玉,高林志,等,2009b.华北克拉通东部新元古代宏体化石生物地层序列.地质论评,55(3):305—317.

王智琳,许德如,Monika,A.K.,等,2015.海南石碌铁矿独居石的成因类型、化学定年及地质意义.岩石学报,31(1):200—216.

萧宗正,1990.北京西山宏观藻类化石的发现.地质科学,25(4):403—407.

杨瑞东,毛家仁,张位华,等,2002.全球早、中寒武世藻类生

物地理分区初探.古地理学报,4(2):12—18.

殷鸿福,1988.中国古生物地理学.武汉:中国地质大学出版社.

张惠民,1995.中国前寒武纪古地磁数据表.地球学报,(4):441—448.

张仁杰,冯少南,徐光洪,等,1989.*Chuaria-Tawuia* 生物群在海南岛石碌群的发现及意义.中国科学(B辑),(3):304—311.

张仁杰,马国干,冯少南,等,1992.海南石碌铁矿的 Sm-Nd 法年龄及其意义.地质科学,(1):38—43.

周金城,王孝磊,邱检生,2008.江南造山带是否格林威尔期造山带——关于华南前寒武纪地质的几个问题.高校地质学报,14(1):64—72.

朱士兴,刑裕盛,张鹏远,等,1994.华北地台中、上元古界生物地层序列.北京:地质出版社.