

两种石龙子精子超微结构的比较*

张永普^{1**} 方周溪² 计翔³

1. 温州师范学院生命与环境科学学院, 浙江温州 325027

2. 温州医学院生命科学学院, 浙江温州 325035

3. 南京师范大学生命科学学院, 南京 210097

摘要 利用透射电镜研究多线南蜥和印度蜓蜥附睾精子的超微结构。两种卵胎生石龙子的精子具有一些有鳞类精子的共同特征, 即具有顶体囊、顶体下锥、单个核前穿孔器和核喙, 无核内管, 纤维鞘伸入中段, 与双联微管 3 和 8 相邻的外周致密纤维具双份纤维结构。多线南蜥和印度蜓蜥精子超微结构的种间差异主要表现在: 多线南蜥精子核前方的顶体下锥电子密度较小, 顶体囊具单侧嵴, 横切面上可见非连续的致密体环或 11 个线粒体; 印度蜓蜥无单侧嵴, 横切面上可见连续的致密体环或 12 个线粒体。迄今未发现石龙子科精子的独征, 但该科不同类群的顶体囊、顶体下腔、核前方的顶体下锥电子致密程度、核肩、纵切面线粒体与致密体的排列方式、横切面致密体环形状和线粒体等精子超微结构特征有一定程度的差异。这些差异可为研究石龙子科系统发生提供辅助信息 [动物学报 52(3): 591-602, 2006]。

关键词 多线南蜥 印度蜓蜥 石龙子科 精子 超微结构

A comparison of the ultrastructure of spermatozoa of two species of skinks *Mabuya multifasciata* and *Sphenomorphus indicus**

ZHANG Yong-Pu^{1**}, FANG Zhou-Xi², JI Xiang³

1. School of Life and Environmental Sciences, Wenzhou Normal College, Wenzhou 325027, Zhejiang, China

2. School of Life Sciences, Wenzhou Medical College, Wenzhou 325035, Zhejiang, China

3. College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

Abstract We studied the ultrastructure of epididymal spermatozoa of two species of viviparous skinks, *Mabuya multifasciata* and *Sphenomorphus indicus*. Sperms of these two species do not differ in the following ultrastructure traits that are thought to be common in squamates: an acrosomal vesicle, a subacrosomal cone, a single prenuclear perforatorium, a nuclear rostrum, absence of an endonuclear canal, the fibrous sheath into the midpiece, and the peripheral dense fibers (presence as a double structure) adjacent to doublets 3 and 8. There are, however, salient differences between *M. multifasciata* and *S. indicus* in the ultrastructure of spermatozoa. The sperm of *M. multifasciata* is characterized by a more lucent epinuclear zone, a unilateral ridge in the acrosome, non-continuous ring structure formed by the dense body or 11 mitochondria in the transverse section. On the contrary, the sperm of *S. indicus* lacks a unilateral ridge in the acrosome, and it is characterized by continuous ring structure formed by the dense body or 12 mitochondria in the transverse section. Evidence for spermatozoal autapomorphies has not yet found in the family Sincidae, but sperms do differ, in various degrees, among different taxa of skinks in such ultrastructure traits as acrosome vesicle, subacrosomal space, transparency in epinuclear zone, nuclear shoulder, arrangement of mitochondria and dense bodies in the longitudinal section, ring structure formed by the dense body and mitochondria in the transverse section. These differences suggest that sperm morphology provides additional information which can be used to study phylogeny of Sincidae [Acta Zoologica Sinica 52(3): 591-602, 2006].

Key words *Mabuya multifasciata*, *Sphenomorphus indicus*, Sincidae, Spermatozoa, Ultrastructure

2005-10-18 收稿, 2006-03-16 接受

* 浙江省教育厅科研基金 (No.20040333) 和温州师范学院科研基金 (No.2003Z18) 资助项目 [This research was founded by grants from Zhejiang Provincial Department of Education (No.20040333) and Wenzhou Normal College (No. 2003Z18)]

** 通讯作者 (Corresponding author). E-mail: zhangypu@126.com

© 2006 动物学报 Acta Zoologica Sinica

精子超微结构所含有的生物信息已被广泛用于有鳞类爬行动物的系统发生分析 (Jamieson and Healy, 1992; Jamieson, 1995; Oliver et al., 1996; Teixeira et al., 1999a, 1999b; Vieira et al., 2004; Vieira et al., 2005)。然而, 因被检的精子超微结构特征和动物类群代表性均较为有限, 基于精子超微结构的系统发生分析究竟适用于什么分类阶元层次尚不明确 (Giugliano et al., 2002)。因此, 比较研究精子超微结构的种间、属间或类群间的差异, 有助于发掘精子结构信息在系统发生分析中的潜在价值。

石龙子科 (Scincidae) 是有鳞类爬行动物中最大的科。过去 30 余年时间里, 国内外同行报道了眼斑石龙子 (*Chalcides ocellatus tiligugu*; Furieri, 1970)、斯氏石龙子 (*Nangura spinosa*; Jamieson and Scheltinga, 1993)、东兰舌石龙子 (*Tiliqua scincoides scincoides*; Jamieson and Scheltinga, 1994)、斑彩石龙子 (*Carlia pectoralis*; Jamieson and Scheltinga, 1994; Jamieson et al., 1996)、铜尾石龙子 (*Ctenotus taeniolatus*; Jamieson and Scheltinga, 1994)、强纹石龙子 (*C. robustus*; Jamieson et al., 1996)、蛇眼石龙子 (*Cryptoblepharus virgatus*; Jamieson et al., 1996)、柔滑蜥 (*Lampropholis delicate*; Jamieson et al., 1996)、中国石龙子 (*Eumeces chinensis*; 张永普等, 2004) 和蓝尾石龙子 (*E. elegans*; 刘永章、张永普, 2004) 等种类的精子超微结构。已被研究的种类仅占全世界 1 000 余种石龙子科动物中的极小部分, 代表性极为有限。

多线南蜥 (*Mabuya multifasciata*) 和印度蜥 (*Sphenomorphus indicus*) 均是卵胎生石龙子科动物, 分别隶属南蜥属 (*Mabuya*) 和蜥属 (*Sphenomorphus*)。多线南蜥国内主要分布在台湾、广东、海南和云南等省份, 印度蜥则能分布至甘肃等纬度更高的省份。迄今为止, 有关南蜥属精子超微结构的工作仅限于零星的描述 (Brandão et al., 2003), 而蜥属的相应工作则完全缺失。本文以多线南蜥和印度蜥为代表, 研究这两属石龙子的精子超微结构, 并根据现有的文献, 比较不同石龙子精子超微结构的异同, 拟为蜥类的系统发生分析提供辅助依据。

1 材料与方法

研究用雄性成体多线南蜥 ($n=3$) 于 2004 年

4 月中旬捕自海南乐东, 雄性成体印度蜥 ($n=6$) 于 2004 年 4 月中、下旬捕自浙江温州洞头岛。2005 年 4 月下旬在温州市郊捕捉雄性成体中国石龙子 ($n=5$) 和蓝尾石龙子 ($n=5$), 用于比较精子全长的种间差异。动物带回实验室后测量体长, 并断头处死, 剖取附睾且速将其切成小于 1 mm^3 的小块。附睾切块一部分用于精子涂片, 在光学显微镜下观察并测量多线南蜥、印度蜥、中国石龙子和蓝尾石龙子的精子全长; 其中多线南蜥和印度蜥的附睾切块剩余部分用 $0.1\text{ mol/L pH } 7.4$ 磷酸缓冲液配制的 2.5% 戊二醛 (v/v) 和 1% 锇酸 (m/m) 双固定, 丙酮梯度脱水, 618 环氧树脂包埋, 瑞典 LKB2088 超薄切片仪切片, 醋酸铀和柠檬酸铅双重染色, 日立 H-7500 型和日本电子 JEM-1200 透射电镜观察、拍照, 底片经扫描、放大、打印后用数显游标卡尺测量顶体复合体长、核喙长、穿孔器长、核长、中段长、核肩部宽和核基部宽 (Teixeira et al., 2002), 并根据底片上的标尺换算成各形态变量的实际长度。文中描述性统计值用平均值 \pm 标准误表示。多线南蜥和印度蜥精子超微结构按蜥类精子超微结构的划分标准 (Jamieson et al., 1996; Scheltinga et al., 2001; Giugliano et al., 2002) 进行描述。

2 结果

多线南蜥和印度蜥精子呈丝状, 由头和尾两部分组成 (图版 I: 1; 图版 III: 1)。头部长而弯曲, 由顶体复合体和核组成; 尾由颈区、中段、主段和末段组成。多线南蜥和印度蜥精子形态变量的测量数据见表 1。

2.1 头部 (Sperm head)

2.1.1 顶体复合体 (Acrosome complex) 多线南蜥和印度蜥精子的顶体复合体均由顶体囊 (Acrosomal vesicle)、顶体下锥 (Subacrosomal cone) 和穿孔器 (Perforatorium) 组成 (图版 I: 2、9; 图版 III: 2、9)。在纵切面上, 顶体复合体前面部分扁平呈铲状 (Spatulate) (图版 III: 2、9)。在横切面上, 核喙前部至顶体前端逐渐扁平 (图版 I: 3-6; 图版 III: 3-6)。顶体囊为顶体复合体的外层锥状帽, 由电子致密物质组成, 其后端壁薄, 呈袖状, 又称顶体袖 (Acrosomal sleeve) (图版 I: 2; 图版 III: 2、9)。顶体下锥位于顶体囊与核之间, 由电子致密物质组成 (图版 I: 2、9; 图版 III: 2、9)。在纵切面上, 顶体囊的前半部

分内有一窄腔, 腔内有 1 个电子致密物质组成的杆状穿孔器, 穿孔器前端稍圆 (图版 I: 2、9, 图版 III: 2)。在过顶体下锥的横切面上, 顶体囊、顶体下锥和核喙呈同心环状排列 (图版 I: 6、7, 图版 III: 6、7)。在纵切面和横切面上, 多线南蜥和印度蜓蜥具顶体下腔 (Subacrosomal space), 多线南蜥的顶体下腔极小, 位于穿孔器周围; 印度蜓蜥的顶体下腔显著, 位于顶体下锥与顶体囊之间 (图版 I: 2, 图版 III: 2、5、6、9)。在纵切面上, 多线南蜥细胞核前前方顶体下锥的电子密度较小 (图版 I: 2、9), 也见于相应位置的横切面 (图版 I: 5)。在横切面上, 多线南蜥顶体下锥前端的顶体囊宽度不对称, 较宽的一侧又称单侧脊 (Unilateral ridge) (图版 I: 5); 印度蜓蜥无单侧脊。

表 1 多线南蜥和印度蜓蜥精子形态变量的测量

Table 1 Measurements of morphological variables of spermatozoa for *Mabuya multifasciata* and *Sphenomorphus indicus*

形态变量*	多线南蜥	印度蜓蜥
	<i>Mabuya multifasciata</i> (n=3)	<i>Sphenomorphus indicus</i> (n=6)
TL (μm)	88.5 \pm 0.6	75.6 \pm 1.4
AL (μm)	4.2 \pm 0.1	4.5 \pm 0.1
PL (μm)	0.59 \pm 0.05	0.61 \pm 0.03
NRL (μm)	2.4 \pm 0.3	2.0 \pm 0.1
NL (μm)	5.0 \pm 0.1	5.2 \pm 0.2
MPL (μm)	6.1 \pm 0.1	6.2 \pm 0.2
NSW (μm)	0.50 \pm 0.02	0.51 \pm 0.01
NBW (μm)	0.66 \pm 0.01	0.67 \pm 0.03

* TL: 精子全长; AL: 顶体复合体长; PL: 穿孔器长; NRL: 核喙长; NL: 核长; MPL: 中段长; NSW: 核肩宽; NBW: 核基宽。

* TL: Total length of sperm; AL: Acrosome complex length; PL: Perforatorium length; NRL: Nuclear rostrum length; NL: Nuclear length; MPL: Midpiece length; NSW: Nuclear shoulders width; NBW: Nuclear base width.

2.1.2 细胞核 (Nucleus) 多线南蜥和印度蜓蜥精子的核长形, 由高度浓缩且电子致密、均质的染色质组成 (图版 I: 2、6–10、12, 图版 III: 2、6–9)。在纵切面上, 核长而弯, 前端逐渐变细呈锥形的部分称核喙 (Nuclear rostrum), 核喙伸入顶体下锥 (图版 I: 2、9, 图版 III: 2、9); 核后端具一圆锥状的核陷窝 (Nuclear fossa), 又称植入窝 (Implantation fossa), 核陷窝较深。核喙基部具圆形的核肩 (Nuclear shoulder) (图版 I: 2, 图版

III: 2), 核肩至核后端的直径稍有增大 (表 1)。在不同水平的横切面上, 核始终呈圆形 (图版 I: 6–8, 10, 图版 III: 6–8, 18)。

2.2 尾部 (Sperm tail)

2.2.1 颈区 (Neck region) 多线南蜥和印度蜓蜥精子的颈区位于核末端与鞭毛前端的交接处, 主要包括连接段 (Connecting piece) 的踝状突 (Capitulum)、近端中心粒、远端中心粒和致密体 (Dense body) (蛇类称为颈筒 (Neck cylinder) (Hamilton and Fawcett, 1968; Harding et al., 1995) 或致密领 (Dense collar) (Jamieson and Koehler, 1994; Oliver et al., 1996))。踝状突由电子致密物质组成, 踝状突背壁的电子致密物质伸入核陷窝 (图版 I: 12, 图版 II: 20, 图版 IV: 17)。踝状突内具一腔, 近端中心粒位于其中 (图版 I: 12, 图版 II: 20、22, 图版 III: 10, 图版 IV: 17)。近端中心粒由 9 组三联微管组成 (图版 II: 22, 图版 III: 10), 近端中心粒内有一电子致密结构 (图版 II: 20)。远端中心粒位于近端中心粒的后面, 两者的长轴近 80° (图版 II: 20, 图版 IV: 17)。远端中心粒外具九束外周致密纤维 (Peripheral dense fiber) (图版 I: 11, 图版 IV: 12)。远端中心粒亦称基体 (Basal body) 或基粒 (Basal granule), 由它产生尾部的轴丝 (Axoneme)。远端中心粒无纤维鞘 (Fibrous sheath) 包围, 由环状排列的九组三联微管和一对中央微管 (Central microtubule) 组成。九条外周致密纤维分别靠近九组三联微管, 一条中央致密纤维 (Central dense fiber) 与中央微管靠近 (图版 I: 11, 图版 IV: 12)。多线南蜥致密体内具电子密度较小的透亮间隙 (图版 II: 20、22)。

2.2.2 中段 (Midpiece) 多线南蜥和印度蜓蜥精子的中段由线粒体鞘 (Mitochondrial sheath)、轴丝、纤维鞘及终环 (Annulus) 组成 (图版 II: 13, 图版 IV: 11)。

多线南蜥和印度蜓蜥精子的线粒体鞘, 位于纤维鞘外, 在纵切面上由致密体和线粒体相间排列而成 (图版 II: 13, 图版 IV: 11)。两种石龙子精子的线粒体, 在纵侧面上呈长柱状排列 (图版 II: 25, 图版 IV: 21); 在横切面上呈卵圆形, 多线南蜥一般含 11 个线粒体, 印度蜓蜥为 12 个 (图版 II: 15, 图版 IV: 13)。两种石龙子精子的致密体呈实体状 (Solid) (图版 I: 12, 图版 II: 13、16、20、22、25, 图版 III: 10, 图版 IV: 11、14、17)。

在横切面上, 多线南蜥精子的致密体形成由2个半环组成的不连续环(图版II: 16), 该结构也见于纵侧面(图版II: 25); 印度蜓蜥的致密体形成连续的环(图版IV: 14), 致密体外缘常嵌有线粒体(图版IV: 12、14)。终环位于中段末端, 为小型致密环。在纵切面上, 终环为不规则的三角形, 紧贴于细胞膜的内表面(图版II: 13、14, 图版IV: 11、21)。在纵切面上, 两种石龙子精子的纤维鞘位于轴丝外(图版II: 13, 图版IV: 11); 在横切面上, 纤维鞘呈环状, 位于轴丝外(图版II: 15-19、26, 图版IV: 13-19)。

多线南蜥和印度蜓蜥精子的轴丝起自远端中心粒的后端, 呈“9+2”型, 外围为9组双联微管, 内有一对分离的中央微管, 各双联微管有明显的放射辐伸向中央微管(图版II: 15-19、26, 图版IV: 13-19)。九束外周致密纤维除双联微管3和8相应的外周纤维外, 其余纤维在轴丝起始处逐渐变细, 直至消失(图版II: 15、16、26, 图版IV: 13-15); 双联微管3和8相邻的外周致密纤维为双份纤维结构(Double fiber structure)(图版II: 26), 至主段前方消失。

表2 石龙子科精子的形态变量比较

Table 2 A comparison of morphological variables of spermatozoa of the family Sincidae (μm)

种类 Species	TL*	AL	NRL	NL	MPL	资料来源 Reference sources
多线南蜥 <i>Mabuya multifasciata</i>	88.8	4.2	2.4	5.0	6.1	本研究 This study
印度蜓蜥 <i>Sphenomorphus indicus</i>	75.7	4.5	2.0	5.2	6.2	本研究 This study
中国石龙子 <i>Eumeces chinensis</i>	51.4	3.7	1.7	3.6	4.3	张永普等, 2004 Zhang et al., 2004
蓝尾石龙子 <i>E. elegans</i>	46.1	3.0	1.7	4.2	4.8	刘永章、张永普, 2004 Liu and Zhang, 2004
铜尾石龙子 <i>Ctenotus taeniolatus</i>	84.0	5.3	2.8	6.8	7.1	Jamieson and Scheltinga, 1994
强纹石龙子 <i>C. robustus</i>	67-73	5.2	2.4	5.2-5.3	5.5	Jamieson et al., 1996
斯氏石龙子 <i>Nangura spinosa</i>	85.4	5.5	2.9	6.6	7.6	Jamieson and Scheltinga, 1993
东兰舌石龙子 <i>Tiliqua scincoides scincoides</i>	57.5	4.1	1.9	5.1	5.5	Jamieson and Scheltinga, 1994
斑彩石龙子 <i>Carlia pectoralis</i>	96.5	2.3	0.96	2.9	11.5	Jamieson and Scheltinga, 1994
蛇眼石龙子 <i>Cryptoblepharus virgatus</i>	不详 Unknown	2.5	1.5	5.3	10.7	Jamieson et al., 1996
柔滑蜥 <i>Lampropholis delicata</i>	不详 Unknown	2.0-2.7	1.0-1.2	3.5	不详 Unknown	Jamieson et al., 1996

*TL: 精子全长; AL: 顶体复合体长; PL: 穿孔器长; NRL: 核喙长; NL: 核长; MPL: 中段长。

* TL: Total length of sperm; AL: Acrosome complex length; PL: Perforatorium length; NRL: Nuclear rostrum length; NL: Nuclear length; MPL: Midpiece length.

2.2.3 主段 (Principal piece) 多线南蜥和印度蜓蜥精子的主段结构相似, 位于中段的终环后, 为精子的最长部分, 由纤维鞘和轴丝组成(图版II: 21, 图版IV: 20)。主段起始处, 质膜与纤维鞘之间较宽(图版II: 14、18, 图版IV: 11、16), 随后, 质膜向纤维鞘靠拢。主段无线粒体和致密体, 所有外周致密纤维和中央纤维消失(图版II: 19, 图版IV: 19)。纤维鞘的厚度随着主段往后延伸逐渐变薄, 至末段交接处消失, 轴丝仍呈“9+2”型。

2.2.4 末段 (Endpiece) 多线南蜥和印度蜓蜥精子的末段结构相似, 末段即从轴丝发出的、位于纤维鞘后的鞭毛部分。末段长度难以测量, 纤维鞘消失, 只有质膜环包于轴丝的外面(图版II: 24)。在近端, 轴丝仍呈“9+2”型; 往后逐渐解体, 排列不规则(图版II: 24)。

3 讨论

石龙子精子的全长、顶体长、核喙长、核长和中段长有一定的种间差异, 其中巨石龙子群精子的中段相对较长, 顶体和核喙则相对较短(表2)。

多线南蜥和印度蜥蜴精子超微结构有一定程度的种间差异。多线南蜥精子核前电子密度较小、顶体下腔极小, 顶体囊具单侧嵴、致密体在横切面上形成非连续的环、横切面上具 11 个线粒体。印度蜥蜴精子顶体下腔发达、顶体囊无单侧嵴、致密体在横切面上形成连续的环、横切面上具 12 个线粒体。然而, 这两种石龙子的精子亦具有有鳞类动物精子的一些共同特征, 即具有顶体囊、顶体下锥、单个核前穿孔器和核喙, 无核内管, 纤维鞘伸入中段, 与双联微管 3 和 8 相邻的外周致密纤维具双份纤维结构 (Jamieson, 1995; Jamieson et al., 1996; Oliver, 1996; Teixeira et al., 1999a, 1999b; Giugliano et al., 2002; Vieira et al., 2004)。

多线南蜥与 Brandão et al. (2003) 报道的三种南蜥属石龙子 (*M. dorsivittata*、*M. frenata* 和 *M. nigropunctata*) 精子超微结构具有共同特征: 顶体前部扁平、核肩圆形、核前方的顶体下锥电子密度较小、中段纵切面上的线粒体与致密体呈相间排列、致密体在横切面上形成非连续的环。然而, Brandão et al. (2003) 对其研究的三种南蜥未做详细描述, 故这三种南蜥的其它特征是否与多线南蜥相同或相异尚不清楚。Jamieson et al. (1996) 根据精子超微结构, 认为蜥蜴群的铜尾石龙子、强纹石龙子、斯氏石龙子和胎生群的东兰舌石龙子与巨石龙子群的斑彩石龙子、蛇眼石龙子和柔滑蜥在顶体、核肩和线粒体的形状以及线粒体与致密体在纵切面上的排列方式等特征方面有明显的差异。多线南蜥、印度蜥蜴、蓝尾石龙子和中国石龙子精子的顶体前部扁平、核肩圆形、线粒体柱状、线粒体与致密体在纵切面上呈相间排列 (Jamieson and Scheltinga, 1993, 1994; Jamieson et al., 1996; 刘永章、张永普, 2004; 张永普等, 2004), 这些特征与 Jamieson et al. (1996) 报道的蜥蜴群和胎生蜥群一致; 而巨石龙子群的顶体始终呈圆形、核肩尖形、线粒体长管状、大小不一的致密体在纵切面上和横切面上均呈不规则散布于线粒体间 (Jamieson and Scheltinga, 1994; Jamieson et al., 1996)。因此, 多线南蜥、印度蜥蜴、蓝尾石龙子和中国石龙子精子超微结构与 Jamieson et al. (1996) 报道的蜥蜴群和胎生蜥群相似。

另外, 精子核前方的顶体下锥电子致密程度、顶体囊的单侧嵴和顶体下腔的有无、横切面上致密体的形状等特征在石龙子科中存在着一定的种间差异, 但这些差异在石龙子科不同种类中未呈现出一

致的规律 (Jamieson and Scheltinga, 1993, 1994; Jamieson et al., 1996; 刘永章、张永普, 2004; 张永普等, 2004)。多线南蜥、蓝尾石龙子、中国石龙子、铜尾石龙子和巨石龙子群的精子核前方的顶体下锥电子密度较小, 且种间存在着不同程度的差异, 而印度蜥蜴、强纹石龙子、斯氏石龙子和东兰舌石龙子精子核前方的顶体下锥电子密度较均匀; 印度蜥蜴、蓝尾石龙子、中国石龙子和巨石龙子群精子的顶体囊无单侧嵴, 而多线南蜥、铜尾石龙子、强纹石龙子、斯氏石龙子和东兰舌石龙子精子的顶体囊具单侧嵴。多线南蜥、印度蜥蜴、中国石龙子、强纹石龙子和斯氏石龙子精子具顶体下腔, 而蓝尾石龙子、铜尾石龙子、东兰舌石龙子和巨石龙子群精子无顶体下腔; 印度蜥蜴、蓝尾石龙子、铜尾石龙子、强纹石龙子、斯氏石龙子和东兰舌石龙子精子的致密体在横切面上形成连续的环, 多线南蜥和中国石龙子形成非连续的环, 而巨石龙子群精子的致密体不规则散布于线粒体间。

综上所述, 石龙子科精子超微结构具有科内多态性现象, 但未发现石龙子科精子的独征 (Autapomorphies)。石龙子科精子的顶体前部形状, 顶体下腔, 顶体囊的单侧嵴, 核前方的顶体下锥电子致密程度, 核肩形状, 纵切面上线粒体与致密体的排列方式, 横切面上线粒体和致密体环的形状等精子超微结构特征以及精子的形态变量在不同类群或种间具有一定的差异。这些特征为石龙子科分类提供了辅助信息, 这些信息有助于研究石龙子科的系统发生。

致谢 本研究承蒙海南琼州大学林焯贤副教授提供多线南蜥, 澳大利亚 Queensland 大学 D. M. Scheltinga 教授提供部分资料以及审稿专家对论文初稿提出宝贵意见, 在此一并表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Brandão JC, Teixeira RD, Colli GR, Bão SN, 2003. Ultrastructure analysis of spermatozoa of lizards of the genus *Mabuia* (Scincidae, Reptilia). *Acta Microscopica* 12 (Suppl. B): 617–618.
- Furieri P, 1970. Sperm morphology of some reptiles: Squamata and Chelonia. In: Baccetti B ed. *Comparative Spermatology*. New York: Accademia Nazionale dei Lincei Rome, Academic Press, 115–131.
- Giugliano LG, Teixeira RD, Colli GR, Bão SN, 2002. Ultrastructure of spermatozoa of the Lizard *Ameiva ameiva*, with considerations on polymorphism within the Family Teiidae (Squamata). *J. Morph.* 253: 264–271.
- Hamilton DW, Fawcett DW, 1968. Unusual features of the neck and middle-piece of snake spermatozoa. *J. Ultra. Res.* 23: 81–97.
- Harding HR, Aplin KP, Mazur M, 1995. The ultrastructure of sperma-

- tozoa of the Australian blindsnakes, *Ramphotyphlops* spp. (Typhlopidae, Squamata): first observation on the mature spermatozoon of scolecophidian snakes. In: Jamieson BGM, Ausio J, Justine J ed. *Advances in Spermatozoal Phylogeny and Taxonomy*. Paris: Muséum National d'Histoire Naturelle, 385–396.
- Jamieson BGM, 1995. The ultrastructure of spermatozoa of the Squamata (Reptilia) with phylogenetic considerations. In: Jamieson BGM, Ausio J, Justine J ed. *Advances in Spermatozoal Phylogeny and Taxonomy*. Paris: Muséum National d'Histoire Naturelle, 359–383.
- Jamieson BGM, Healy JM, 1992. The phylogenetic position of the tuatara *Sphenodon* (Sphenodontida, Amniota), as indicated by cladistic analysis of the ultrastructure of spermatozoa. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 335: 207–219.
- Jamieson BGM, Koehler L, 1994. The ultrastructure of the spermatozoon of the northern water snake *Nerodia sipedon* (Colubridae, Serpentes) with phylogenetic considerations. *Can. J. Zool.* 72: 1 648–1 652.
- Jamieson BGM, Oliver SC, Scheltinga DM, 1996. The ultrastructure of spermatozoa of Squamata. I. Scincidae, Gekkonidae and Pygopodidae (Reptilia). *Acta Zool. (Stockholm)* 77: 85–100.
- Jamieson BGM, Scheltinga DM, 1993. The ultrastructure of spermatozoa of *Nangura spinosa* (Scincidae, Reptilia). *Mem. Queensl. Mus.* 12 (24): 169–179.
- Jamieson BGM, Scheltinga DM, 1994. The ultrastructure of spermatozoa of the Australian skinks, *Ctenotus taeniolatus*, *Carlia pectoralis* and *Tiliqua scincoides scincoides* (Scincidae, Reptilia). *Mem. Queensl. Mus.* 37: 181–193.
- Liu YZ, Zhang YP, 2004. The ultrastructure of the spermatozoa of *Eumeces elegans*. *Zool. Res.* 25: 429–435 (In Chinese).
- Oliver SC, Jamieson BGM, Scheltinga DM, 1996. The ultrastructure of spermatozoa of Squamata. II. Agamidae, Varanidae, Colubridae, Elapidae, and Boidae (Reptilia). *Herpetologica* 52: 216–241.
- Scheltinga DM, Jamieson BGM, Espinoza RE, Orrell KS, 2001. Descriptions of the mature spermatozoa of the lizards *Crotaphytus bicinctores*, *Gambelia wislizenii* (Crotaphytidae) and *Anolis carolinensis* (Polychrotidae) (Reptilia, Squamata, Iguania). *J. Morph.* 247: 160–171.
- Teixeira RD, Colli GR, Báo SN, 1999a. The ultrastructure of the spermatozoa of the lizard *Micrablepharus maximiliani* (Squamata, Gymnophthalmidae), with considerations on the use of sperm ultrastructure characters in phylogenetic reconstruction. *Acta Zool. (Stockholm)* 80: 47–59.
- Teixeira RD, Colli GR, Báo SN, 1999b. The ultrastructure of the spermatozoa of the worm-lizard *Amphisbaena alba* (Squamata, Gymnophthalmidae), and the phylogenetic relationships of amphisbaenians. *Can. J. Zool.* 77: 1 254–1 264.
- Teixeira RD, Scheltinga DM, Trauth SE, Colli GR, Báo SN, 2002. A comparative ultrastructural study of spermatozoa of the teiid lizards *Cnemidophorus gularis gularis*, *Cnemidophorus ocellifer*, and *Kentropyx altamazonica* (Reptilia, Squamata, Teiidae). *Tissue & Cell.* 34 (3): 135–142.
- Vieira GHC, Colli GR, Báo SN, 2004. The ultrastructure of the spermatozoon of the lizard *Iguana iguana* (Reptilia, Squamata, Iguanidae) and the variability of sperm morphology among iguanian lizards. *J. Anat.* 204 (6): 451–464.
- Vieira GHC, Colli GR, Báo SN, 2005. Phylogenetic relationships of corytophanid lizards (Iguania, Squamata, Reptilia) based on partitioned and total evidence analyses of sperm morphology, gross morphology, and DNA data. *Zoologica Scripta* 34: 605–625.
- Zhang YP, Hu JR, Ji X, 2004. Ultrastructure of spermatozoa of the Chinese skink *Eumeces chinensis*. *Acta Zool. Sinica* 50: 431–441 (In Chinese).
- 刘永章, 张永普, 2004. 蓝尾石龙子精子的超微结构. *动物学研究* 25: 429–435.
- 张永普, 胡健饶, 计翔, 2004. 中国石龙子成熟精子的超微结构. *动物学报* 50: 431–441.

图 版 说 明

图版 I 多线南蜥精子超微结构 (图 2–12 比例尺相同)

1. 精子的光学显微照片, 示头和尾部。
2. 头部前端纵切, 示顶体囊、顶体下锥、穿孔器、顶体下腔、核喙和核肩。
3. 顶体前端横切, 示扁平状的顶体囊。
4. 穿孔器横切, 示顶体囊、穿孔器。
5. 核前顶体下锥横切, 示顶体囊、顶体下锥和单侧嵴。
6. 核喙横切, 示核喙、顶体囊和顶体下锥。
7. 核喙横切, 示核喙、顶体囊和顶体下锥。
8. 核横切, 示核。
9. 头部前端纵切, 示顶体囊、顶体下锥、穿孔器和核喙。
10. 核陷窝横切, 示核和核陷窝。
11. 远端中心粒横切, 示远端中心粒、致密体、线粒体、中央纤维和外周致密纤维。
12. 颈区纵切, 示核陷窝、踝状突、近端中心粒和远端中心粒。

图版 II 多线南蜥精子超微结构 (图 15–24 比例尺相同)

13. 中段纵切, 示致密体和线粒体的排列、轴丝、纤维鞘、远端中心粒和终环。
14. 中段后区和主段前区纵切, 示终环和轴丝。
15. 中段横切, 示线粒体和轴丝。
16. 中段横切, 示致密体和轴丝。
17. 终环横切, 示终环、线粒体和轴丝。
18. 主段前区横切, 示轴丝。
19. 主段横切, 示轴丝。

20. 颈区纵切, 示踝状突、近端中心粒、远端中心粒和近端中心粒内的致密物质。
21. 主段纵切, 示轴丝。
22. 颈区纵切, 示近端中心粒。
23. 末段纵切, 示轴丝。
24. 末段横切, 示轴丝。
25. 中段侧面纵切, 示致密体和线粒体。
26. 中段轴丝横切, 示外周致密纤维 3 和 8。

图版 III 印度蜓蜥精子超微结构 (图 2-10 比例尺相同)

1. 精子的光学显微照片, 示头和尾部。
2. 头部前端纵切, 示顶体囊、顶体下锥、穿孔器、顶体下腔、核喙和核肩。
3. 顶体前端横切, 示扁平状的顶体囊。
4. 穿孔器横切, 示顶体囊和穿孔器。
5. 核前顶体下锥处横切, 示顶体下腔、顶体囊和顶体下锥。
6. 核喙横切, 示核喙、顶体下腔、顶体囊和顶体下锥。
7. 核喙横切, 示核喙、顶体囊和顶体下锥。
8. 核横切, 示核。
9. 头部前端纵切, 示顶体囊、顶体下锥、穿孔器、顶体下腔和核喙。
10. 颈区纵切, 示踝状突和近端中心粒。

图版 IV 印度蜓蜥精子超微结构 (图 12-20 比例尺相同)

11. 中段纵切, 示致密体和线粒体的排列、轴丝、纤维鞘、远端中心粒和终环。
12. 远端中心粒横切, 示远端中心粒、致密体、线粒体、中央纤维和外周致密纤维。
13. 中段横切, 示线粒体和轴丝。
14. 中段横切, 示致密体和轴丝。
15. 终环横切, 示线粒体、终环和轴丝。
16. 主段前区横切, 示轴丝。
17. 颈区纵切, 示踝状突、近端中心粒和远端中心粒。
18. 核陷窝横切, 示核和核陷窝。
19. 主段横切, 示轴丝。
20. 主段纵切, 示轴丝。
21. 中段侧面纵切, 示致密体和线粒体。

av: 顶体囊。an: 终环。ax: 轴丝。ca: 踝状突。cf: 中央纤维。db: 致密体。dc: 远端中心粒。dp: 近端中心粒内致密物质。fs: 纤维鞘。
h: 头部。mi: 线粒体。n: 细胞核。nf: 核陷窝。nr: 核喙。ns: 核肩。p: 穿孔器。pc: 近端中心粒。pf: 外周致密纤维。sc: 顶体下锥。
ss: 顶体下腔。t: 尾部。ur: 单侧嵴。

Explanation of Plates

Plate I The ultrastructure of spermatozoa of *Mabuya multifasciata* (the scale bars for figures 2-12 are in the same length)

1. LM photograph of spermatozoa, showing head and tail.
2. Longitudinal section of the anterior region of the head, showing acrosome vesicle, subacrosomal cone, perforatorium, subacrosomal space, nuclear rostrum and nuclear shoulder.
3. Transverse section through the anterior region of the acrosome, showing flattened acrosome vesicle.
4. Transverse section through the perforatorium, showing acrosome vesicle and perforatorium.
5. Transverse section through the subacrosomal cone of the prenuclear, showing acrosome vesicle, subacrosomal cone and unilateral ridge.
6. Transverse section through the nuclear rostrum, showing nuclear rostrum, acrosome vesicle and subacrosomal cone.
7. Transverse section through the nuclear rostrum, showing nuclear rostrum, acrosome vesicle and subacrosomal cone.
8. Transverse section through the nucleus, showing nucleus.
9. Longitudinal section of the anterior region of the head, showing acrosome vesicle, subacrosomal cone, perforatorium and nuclear rostrum.
10. Transverse section through the nuclear fossa, showing nucleus and nuclear fossa.
11. Transverse section of the distal centriole, showing distal centriole, dense body, mitochondria, central fiber and peripheral dense fiber.
12. Longitudinal section of the neck region, showing nuclear fossa, capitulum, proximal centriole and distal centriole.

Plate II The ultrastructure of spermatozoa of *Mabuya multifasciata* (the scale bar of figures 15 – 24 are in the same length)

13. Longitudinal section of the midpiece, showing arrangements of dense bodies and mitochondria, axoneme, fibrous sheath, distal centriole and annulus.
14. Longitudinal section of the posterior region of the midpiece and the anterior region of the principal piece, showing annulus and axoneme.
15. Transverse section through the midpiece, showing mitochondria and axoneme.
16. Transverse section through the midpiece, showing dense body and axoneme.
17. Transverse section through the annulus, showing annulus, mitochondria and axoneme.
18. Transverse section through the anterior region of the principal piece, showing axoneme.
19. Transverse section through the principal piece, showing axoneme.
20. Longitudinal section of the neck region, showing capitulum, proximal centriole, distal centriole and density within the center of the proximal centriole.
21. Longitudinal section of the principal piece, showing axoneme.
22. Longitudinal section of the neck region, showing proximal centriole.
23. Longitudinal section of the endpiece, showing axoneme.
24. Transverse section through the endpiece, showing axoneme.
25. Longitudinal section of the lateral midpiece, showing dense bodies and mitochondria.
26. Transverse section through the axoneme of the midpiece, showing peripheral dense fiber 3 and 8.

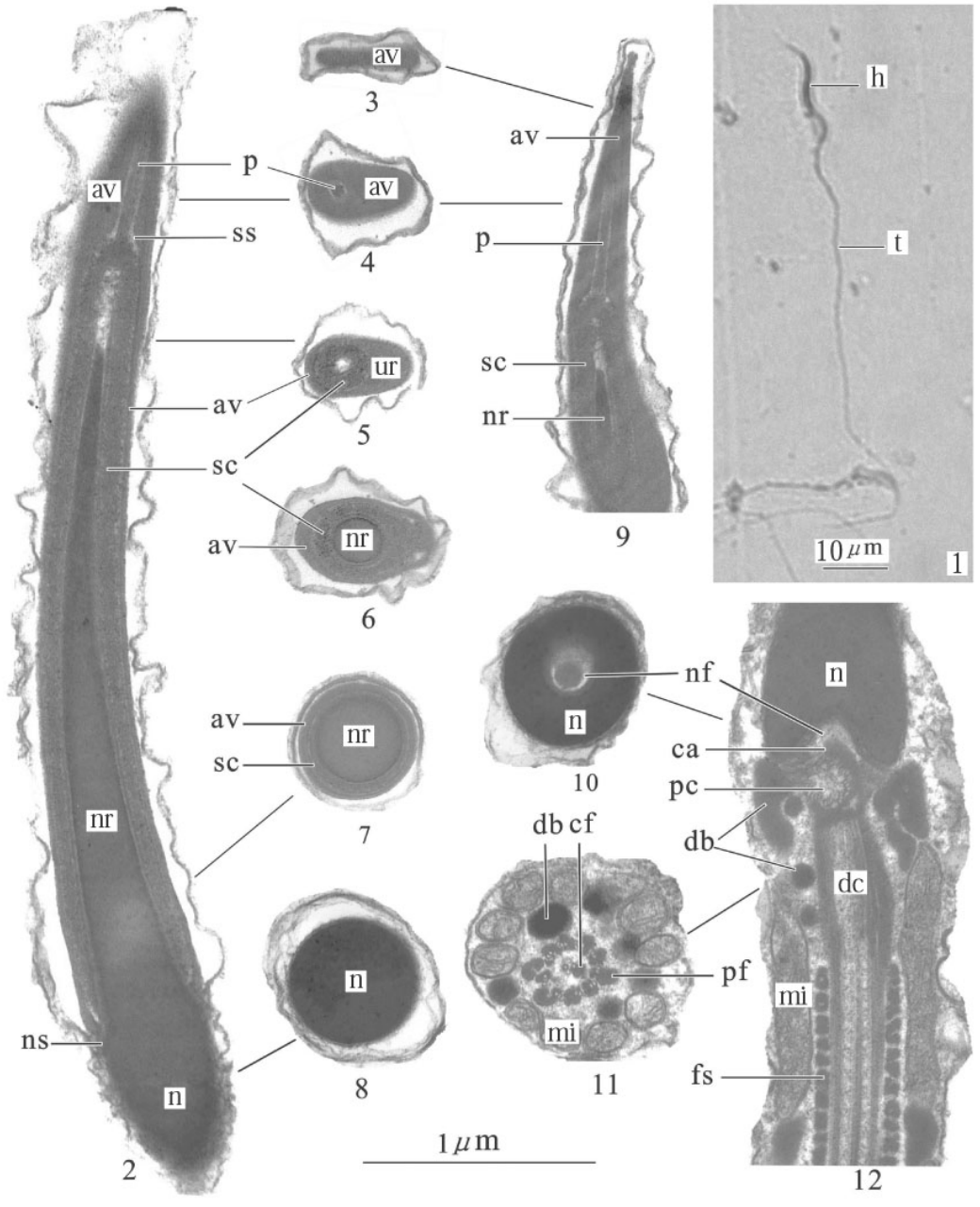
Plate III The ultrastructure of spermatozoa of *Sphenomorphus indicus* (the scale bar of figures 2 – 10 are in the same length)

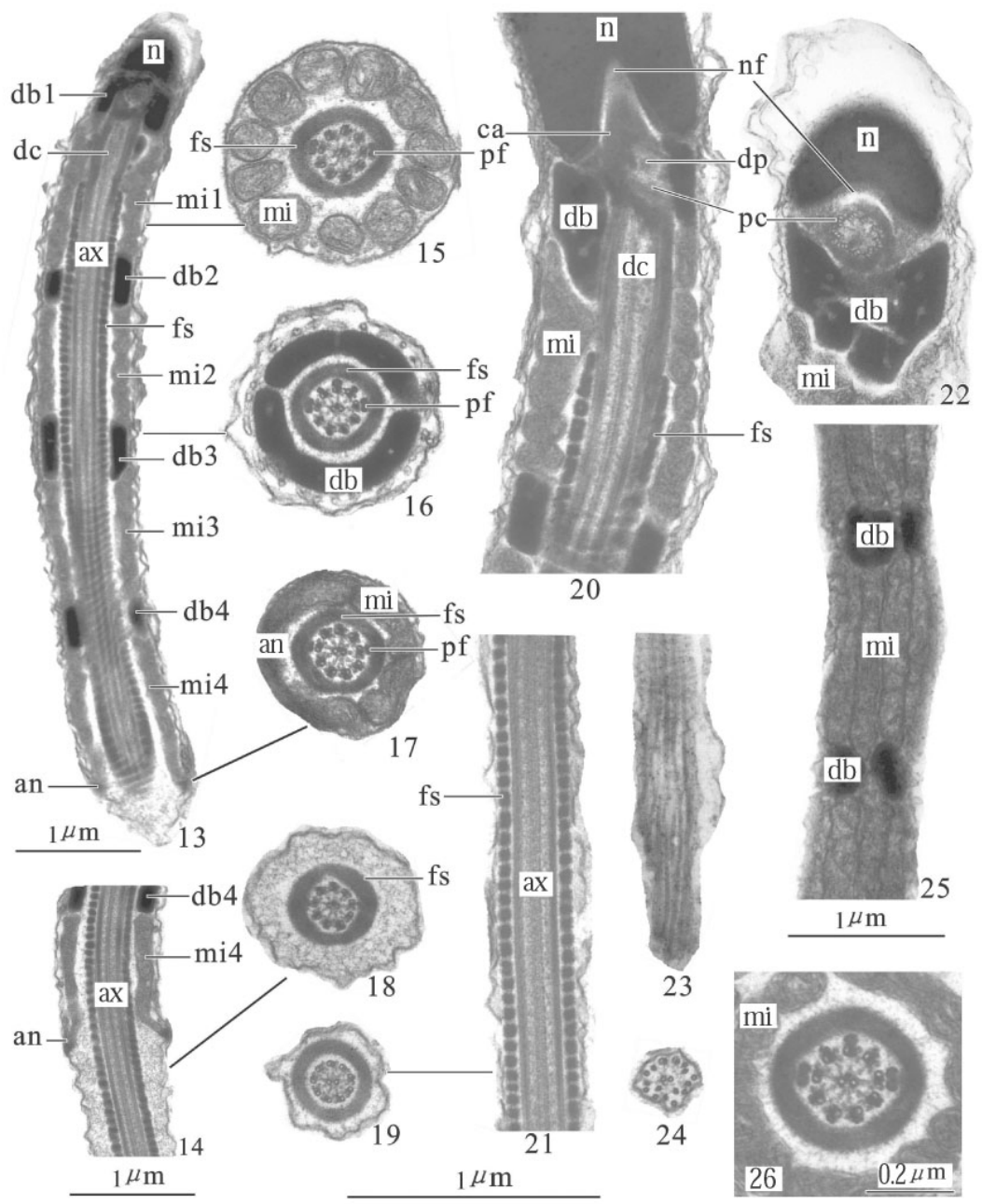
1. LM photograph of spermatozoa, showing head and tail.
2. Longitudinal section of the anterior region of the head, showing acrosome vesicle, subacrosomal cone, perforatorium, subacrosomal space, nuclear rostrum and nuclear shoulder.
3. Transverse section through the anterior region of the acrosome, showing flattened acrosome vesicle.
4. Transverse section through the perforatorium, showing acrosome vesicle and perforatorium.
5. Transverse section through the subacrosomal cone of the prenuclear, showing subacrosomal space, acrosome vesicle and subacrosomal cone.
6. Transverse section through the nuclear rostrum, showing nuclear rostrum, subacrosomal space, acrosome vesicle and subacrosomal cone.
7. Transverse section through the nuclear rostrum, showing nuclear rostrum, acrosome vesicle and subacrosomal cone.
8. Transverse section through the nucleus, showing nucleus.
9. Longitudinal section of the anterior region of the head, showing acrosome vesicle, subacrosomal cone, perforatorium, subacrosomal space and nuclear rostrum.
10. Longitudinal section of the neck region, showing capitulum and proximal centriole.

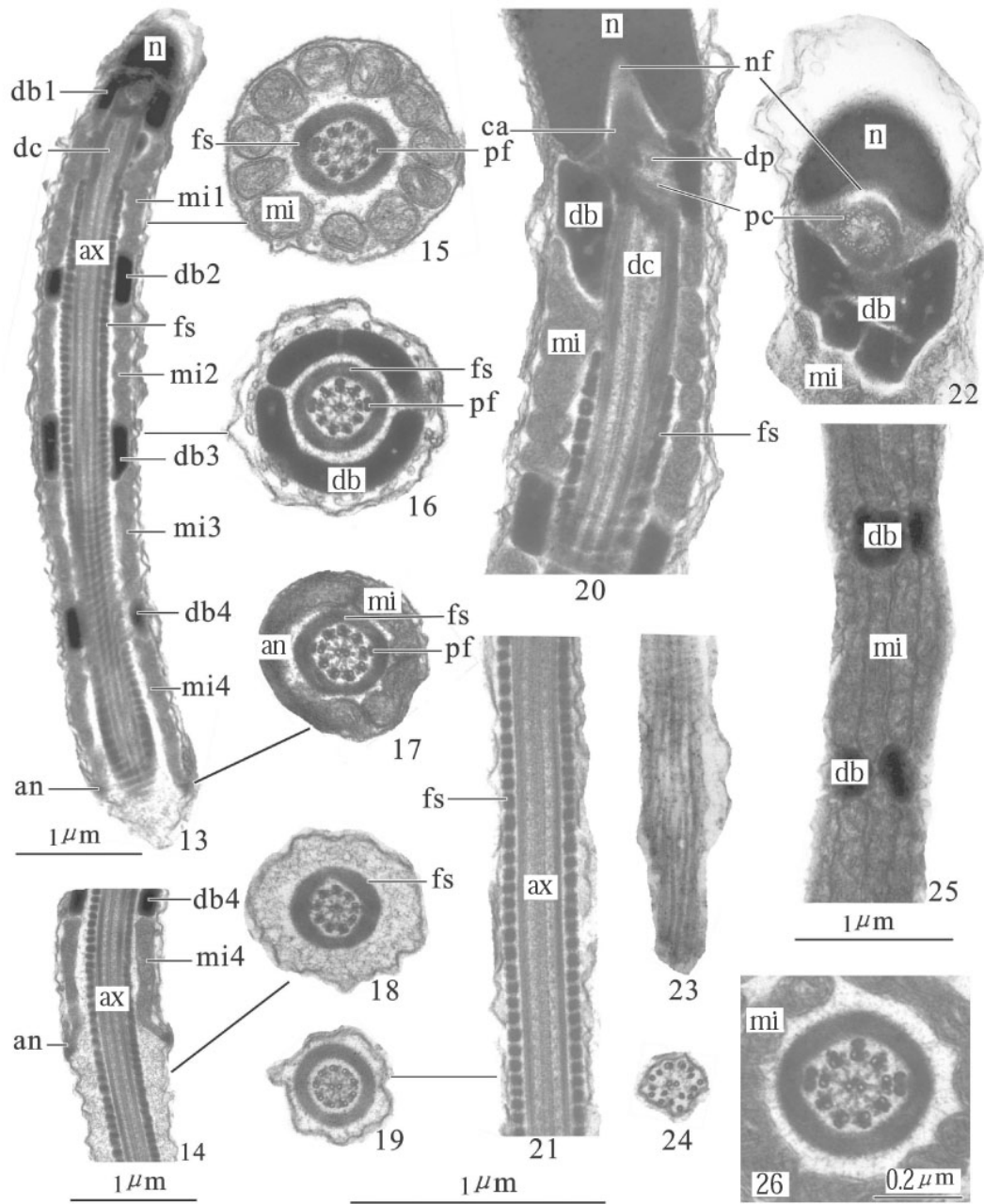
Plate IV The ultrastructure of spermatozoa of *Sphenomorphus indicus* (the scale bar of figures 12 – 20 are in the same length)

11. Longitudinal section of the midpiece, showing arrangements of dense bodies and mitochondria, axoneme, fibrous sheath, distal centriole and annulus.
12. Transverse section through the distal centriole, showing distal centriole, dense body, mitochondria, central fiber and peripheral dense fiber.
13. Transverse section through the midpiece, showing mitochondria and axoneme.
14. Transverse section through the midpiece, showing dense body and axoneme.
15. Transverse section through the annulus, showing mitochondria, annulus and axoneme.
16. Transverse section through the anterior region of the principal piece, showing axoneme.
17. Longitudinal section of the neck region, showing capitulum, proximal centriole and distal centriole.
18. Transverse section through the nuclear fossa, showing nucleus and nuclear fossa.
19. Transverse section through the principal piece, showing axoneme.
20. Longitudinal section of the principal piece, showing axoneme
21. Longitudinal section of the lateral midpiece, showing dense body and mitochondria.

av: acrosome vesicle. an: annulus. ax: axoneme. ca: capitulum. cf: central fiber. db: dense body. dc: distal centriole. dp: density within the center of the proximal centriole. fs: fibrous sheath. h: head. mi: mitochondria. n: nucleus. nf: nuclear fossa. nr: nuclear rostrum. ns: nuclear shoulder. p: perforatorium. pc: proximal centriole. pf: peripheral dense fiber. sc: subacrosomal cone. ss: subacrosomal space. t: tail. ur: unilateral ridge.







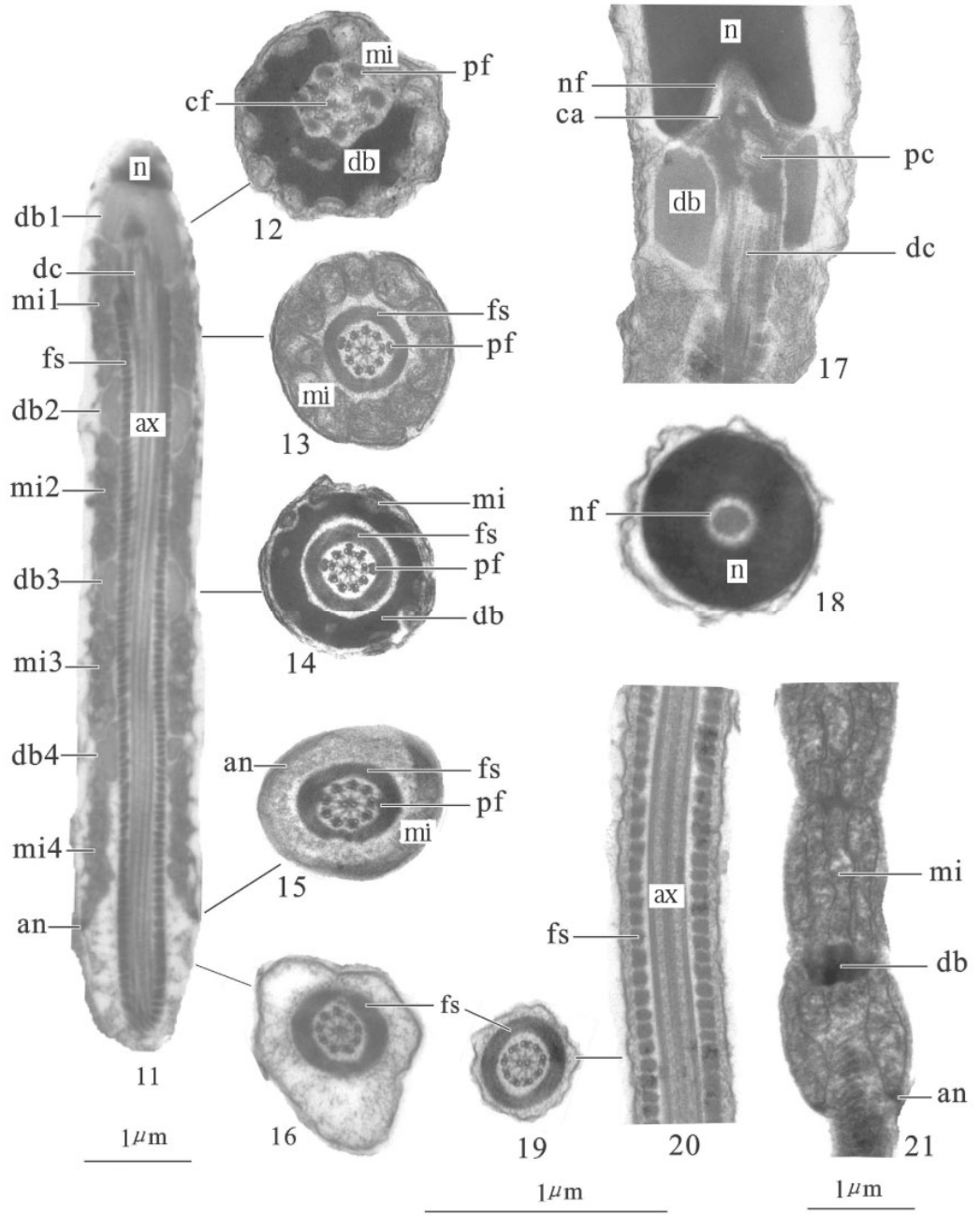


图 4 印度蜓蜥精子超微结构的电镜照片