

胡子鲇、月鳢、泥鳅具气呼吸作用器官呼吸上皮的电镜观察

刘文生 王凤麟

(华南农业大学动物科学学院, 广州 510642)

摘要: 应用扫描电子显微镜与透射电子显微镜技术观察了具气呼吸作用的胡子鲇树枝状鳃上器、月鳢耳片状鳃上器和泥鳅的肠等器官, 证实 3 种淡水鱼类具气呼吸作用的器官表面均被覆一层高度毛细血管化的呼吸上皮。胡子鲇的呼吸上皮表面形态呈玉米棒状, 月鳢的鳃上器表面为半圆形鹅卵石状, 泥鳅肠内壁表面如云朵状。这 3 种器官的呼吸上皮细胞均为同一种类型, 是一类特化的扁平上皮细胞, 兼有哺乳类肺泡 I 型和 II 型上皮细胞的细微结构特征。同时, 构成气血屏障的三部分即呼吸上皮细胞、毛细血管内皮细胞胞质薄层和两者之间的基底膜与其他脊椎动物的呼吸器官极为相似。

关键词: 胡子鲇; 月鳢; 泥鳅; 气呼吸作用; 超微结构

中图分类号: S917 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2004)05-0519-07

鳃呼吸不是鱼类获取氧气的惟一方式, 兼有水呼吸和气呼吸两种方式于一体在硬骨鱼类中很普遍^[1]。较早发现的南美肺鱼 *Lepisosteus paradoxus*、非洲肺鱼 *Protopterus aethiopicus* 都是显著的双呼吸鱼类^[2]。作者曾经发现和报道了一种原产东南亚国家的淡水鲇鱼类——科苏氏鲇 *Pangasius sutchi* 的鳃具有气呼吸作用的同时其鳃发达完好并保持水呼吸^[3-5]。迄今为止, 鱼类的气呼吸作用还发现于口腔腔黏膜上皮、鳃上器、迷路器、气囊、胃、肠和体表皮肤等处^[6], 这些器官的气呼吸作用对鱼类的生存和生活来说是重要和必需的。鱼类的气呼吸器官具有一层特化超薄的呼吸上皮, 呼吸上皮表面的形态呈多样性, 而不同的气呼吸器官却具有形态和细微结构基本相同的同一类型的上皮细胞并兼有哺乳类肺泡 I 型和 II 型上皮细胞的结构特征^[6-8]。鲇形目 (Siluriformes)、胡子鲇科的胡子鲇 *Clarias fuscus* (Lacépède)、鲈形目 (Perciformes)、鳢科的月鳢 *Channa asiatica* (Linnaeus)、鲤形目 (Cypriniformes)、鳅科的泥鳅 *Misgurnus anguillicaudatus* (Cantor) 的气呼吸作用及相关器官早已被发现^[9], 但对其呼吸上皮超微结构的详细研究至今未见报道。本文主要对这 3 种气呼吸鱼类的呼吸上皮表面形态及超微结构进行观

察, 并与哺乳类的肺泡上皮比较, 这将对脊椎动物呼吸器官的起源和形成提供重要的生物学资料。

1 材料与方法

实验选购 1 龄鱼胡子鲇、月鳢、泥鳅于实验室水族箱内暂养 2d 后取材。用鱼网先后捞出实验鱼, 剪取胡子鲇、月鳢鳃上器部分组织块和泥鳅的肠后段, 用生理盐水清洗表面血污和黏液后, 立即放进 4% 戊二醛溶液中固定, 置于冰箱冷藏过夜, 待用。

扫描电镜观察材料经 4% 戊二醛溶液前固定后, 用磷酸缓冲液冲洗 3 次, 每次 10min, 再用 1% 锇酸后固定, 4h 后用磷酸缓冲液冲洗 3 次, 每次 10min, 梯度酒精脱水, 醋酸异戊二酯过渡 2 次, 每次 15min, 临界点干燥、装台、镀金, JSM-25S 型扫描电子显微镜观察、拍照。透射电镜材料经 4% 戊二醛溶液前固定, 磷酸缓冲液冲洗 6 次 (20min/次) 后, 用 1% 锇酸固定, 磷酸缓冲液冲洗 6 次, 梯度酒精脱水, 环氧丙烷过渡, 环氧丙烷与环氧树脂 (Epon812) 分别以 3: 1、1: 1、1: 3 比例及纯 Epon812 依次渗透, Epon812 包埋, LKB 型超薄切片机切片, 醋酸铀-柠檬酸铅双重染色, JEM-1010 型透射电子显微镜观察、拍照。

收稿日期: 2003-09-11; 修订日期: 2003-11-30

基金项目: 广东省科技厅农业重点攻关项目 (C20810) 资助

作者简介: 刘文生 (1965—), 男, 广东澄海人; 副教授, 博士研究生; 主要从事鱼类学及育种研究

2 结果

2.1 胡子鲇鳃上器呼吸上皮的电镜观察

胡子鲇鳃上器位于头部两侧的鳃腔上部, 打开鳃盖即可明显见到鳃弓后背方连着一对树枝状器官, 即为鳃上器, 它们分别由第二和第四鳃弓上的鳃丝向外伸出演变, 从底部向上方延伸并多次分枝而形成。

鳃上器的树枝状分枝表面形态呈玉米状突起排列, 这些突起是由平行排列有序的毛细血管隆起形成, 每列毛细血管段都与树枝状鳃上器分支的纵轴平行, 列与列之间下陷成沟, 分界明显(图版 I: 1)。毛细血管外层被呼吸上皮细胞覆盖, 表面凹凸不平, 并可看到毛细血管内红细胞由于集挤而突出, 轮廓十分清晰。上皮细胞呈多边形, 细胞之间的连接紧密, 连接缝稍向外突起加厚, 整个细胞外表面有密集的短绒毛(图版 I: 2)。

呼吸上皮呈高度毛细血管化, 紧密相邻的两列毛细血管由单一个柱状支持细胞隔开。支持细胞核圆形, 较大, 胞质少(图版 I: 7)。呼吸上皮的上皮细胞为扁平状, 胞核外周的胞质特化延伸为扁平的胞质薄层, 被覆在毛细血管周围。上皮细胞的胞核近长椭圆形, 边缘较光滑, 染色深, 富于异染色质, 邻近胞核处的胞质中有大量粗面内质网和大小不一的空泡, 多数粗面内质网均有囊泡。嗜钼性板层体散布在粗面内质网之间, 体积比囊泡大 4—5 倍, 板层体内的同心圆或平行排列的板层状结构虽几近液化状, 但电子密度仍很高, 上皮细胞之间以紧密连接相连(图版 I: 8)。在与空气接触的外表面, 上皮细胞具有许多较短的微绒毛。毛细血管壁由单层内皮细胞构成, 相邻的内皮细胞边缘互相交错叠加, 以紧密连接相连, 内皮细胞与上皮细胞形态相似, 胞质极度延伸为扁平的胞质薄层, 内皮细胞胞核为不规则的长椭圆形, 位于毛细血管内侧。由单层上皮细胞胞质薄层、基底膜和单层内皮细胞胞质薄层组成气血屏障, 有些地方紧贴上皮细胞基底侧尚观察到一层支持细胞的胞质延伸薄层(图版 I: 9), 构成鳃上器的气体交换场所。

2.2 月鳢鳃上器呼吸上皮的电镜观察

月鳢的鳃上器位于鳃腔前背方靠内侧, 左右成对, 呈耳片状突起, 由第一鳃弓的上鳃骨和舌颌骨内面的骨质突构成, 肉眼可见表面血管密布, 颜色鲜红。

鳃上器表面如半圆形鹅卵石状的突起铺覆, 大小一致, 实际上是毛细血管的隆起, 血管内充塞红细

胞, 其外形略为清楚, 部分没有红细胞的毛细血管表面则下凹(图版 I: 3)。高倍放大后可见鹅卵石状突起之间的表面分布密集的微绒毛, 突起部分则光滑, 仅有极稀少的微绒毛, 呈短点状(图版 I: 4)。

呼吸上皮细胞和紧贴其基底部的毛细血管网及结缔组织组成呼吸上皮(图版 II: 1), 在毛细血管旁有一长条形的黏液细胞。上皮细胞的胞核呈不规则形, 较大, 胞核周围的胞质中有若干嗜钼性板层体、大量线粒体和内质网, 与胡子鲇的呼吸上皮细胞一样, 内质网中也有囊泡。毛细血管内皮细胞的胞质薄层极薄, 厚度只有上皮细胞胞质薄层的 $1/4-1/5$, 胞质内有许多胞饮小泡并可观察到胞饮过程(图版 II: 2)。毛细血管内的红细胞呈长椭圆形, 核位于中央、染色深, 内皮细胞与上皮细胞之间的基底膜厚度均匀, 较薄。由上皮细胞胞质薄层、内皮细胞胞质薄层以及二者之间的基底膜共同构成月鳢呼吸上皮的气血屏障(图版 II: 3)。

2.3 泥鳅肠呼吸上皮的电镜观察

泥鳅的后肠壁薄而透明, 肠腔内充气而显膨胀, 肠壁血管丰富, 具有气呼吸功能。泥鳅的肠内壁表面布满了大小不规则的云朵状皱褶(图版 I: 5)。高倍放大可见皱褶的表面密被短小的微绒毛, 呼吸上皮细胞之间界限明显, 细胞呈多边形(图版 I: 6)。

呼吸上皮呈毛细血管化, 上皮细胞含胞核的部分镶嵌在相邻的毛细血管之间(图版 II: 4), 细胞核位于近底部, 形状不规则, 边缘染色较深, 富于异染色质。胞核区的胞质较厚, 向外两侧延伸越来越薄, 并覆盖在毛细血管外侧管壁上。上皮细胞近外边缘胞质内有大量嗜钼性板层体、粗面内质网、线粒体及一些空泡(图版 II: 5)。板层体大小不均, 较大, 同心圆板层之间分界明显, 中间部分变成液化状(图版 II: 6)。肠腔面的上皮细胞具有许多微绒毛。

毛细血管横切面呈不规则形, 内有许多红细胞。管壁由单层内皮细胞构成, 内皮细胞与上皮细胞形态相似, 胞质极度延伸为扁平的胞质薄层, 内皮细胞核形状不规则, 位于毛细血管内侧。内皮细胞连接为交错式, 相邻内皮细胞之间延伸指形突起彼此交叉贴靠, 形成紧密连接(图版 II: 7)。上皮细胞顶部为紧密连接, 相邻两上皮细胞互相紧贴, 紧密连接下方则以中间连接相联。上皮细胞的胞质薄层、内皮细胞的胞质薄层及二者之间的薄层基底膜构成气血屏障(图版 II: 8)。

3 讨论

胡子鲇、月鳢、泥鳅 3 种淡水鱼类进行气呼吸作

用的重要器官表面均被覆一层高度毛细血管化的呼吸上皮。呼吸上皮由上皮细胞层和紧贴其下的毛细血管层组成, 其间还有支持着呼吸上皮层的其他结缔组织, 是完成气体交换的重要场所。3 种气呼吸器官的呼吸上皮各有特点, 胡子鲇鳃上器的表面呈玉米棒状排列, 呼吸上皮的游离面富有短小、密集的微绒毛; 月鳢鳃上器的表面呈半圆形鹅卵石状突起, 表面的微绒毛多出现在突起周围, 中央部分光滑; 泥鳅肠的呼吸表面为云朵状, 呼吸上皮外生密集、短小的微绒毛。有关这类气呼吸器官呼吸上皮微绒毛的作用, 一般认为是增大其呼吸表面积^[7, 10], 作者认为呼吸上皮细胞的微绒毛多数出现在富含嗜锳性板层体的细胞质外表面, 而在气体交换的主要部位即延伸超薄的胞质层则较少微绒毛出现, 说明微绒毛与增大呼吸表面积没有直接关系, 而与板层体向外分泌表面活性物质有关的可能性更大。

覆盖 3 种气呼吸器官表面的呼吸上皮细胞均为同一类型细胞, 上皮细胞极为扁平, 除了近胞核周围较厚外, 其他部分胞质均延伸变薄并覆盖在毛细血管外侧。上皮细胞核为近扁椭圆状或不规则, 边缘有凹痕, 异染色质明显, 胞质中共同特征是含有丰富的嗜锳性板层体、粗面内质网及空泡和线粒体。根据形态特点并与哺乳动物肺泡上皮比较, 证实呼吸上皮细胞兼有 I 型和 II 型细胞的结构特征。卢晓晔等在小鼠肺泡发育观察中发现小鼠出生时肺泡上皮以 II 型肺泡细胞为主, I 型肺泡细胞的大量出现是在出生以后, 而在胚胎 19d 时见到较 II 型肺泡细胞略扁的中间类型^[11]。鱼类气呼吸器官的呼吸上皮细胞是否类似鼠肺泡上皮的中间型细胞或比 I、II 型肺泡上皮细胞更原始还有待于进一步证实。

肺泡 II 型上皮细胞具有合成和分泌肺表面活性物质, 促进肺泡表面液体和电解质的跨上皮运输的功能^[12]。从大鼠分离出的肺泡 II 型上皮细胞在培养 2、3d 后即形成向上拱起的单层“圆顶”, 说明 II 型上皮细胞可将外侧的物质主动转运到基底侧, 同时, II 型上皮细胞富含为主动转运提供必需能量的线粒体^[13]。板层体数目和形态的相对稳定是肺泡 II 型上皮细胞发挥正常功能的重要基础, 由板层体释放的表面活性物质具有防止肺泡塌陷作用^[14, 15]。在胡子鲇、月鳢和泥鳅的呼吸上皮细胞中均有数量较多、大小不一的板层体, 但是, 从胡子鲇的树枝状鳃上器、月鳢的耳片状鳃上器和泥鳅的肠上皮的形态看, 并不存在类似肺泡或其他泡囊的结构, 那么, 呼吸上皮细胞板层体的作用显然不是为了防止鳃上器

或肠管的塌陷。肺泡表面活性物质是以 90% 的磷脂酰胆碱的脂质和 10% 的蛋白质复合物为成分^[16], 这 3 种鱼类板层体的作用是否通过分泌表面活性物质并与气体交换有关, 即空气中的氧气与呼吸上皮的表面活性物质中的蛋白质结合, 然后才转移到毛细血管里的红细胞, 尚待进一步研究。鱼类是生活在水中, 呼吸上皮表面容易被水或其他物质玷污, 通过板层体分泌的表面活性物质将有利于维持整个呼吸表面的稳定性及发挥正常功能。

气血屏障是气体交换的必经之路, 胡子鲇、月鳢、泥鳅具气呼吸作用的器官有极其相似的气血屏障基本结构, 都是由超薄的上皮细胞延伸的胞质层及与其相似的内皮细胞胞质薄层和两者之间的基底膜组成, 从鱼类到哺乳类, 呼吸器官的气血屏障的组成结构没有出现多大的变化, 都是三层结构^[17], 气体交换的效率与气血屏障的厚薄有关^[8], 但是即使同一处的气血屏障的厚度也随着毛细血管的血流不断发生变化。

气呼吸鱼类的分布具有全球性, 如肺鱼类分别在南美洲、非洲和澳洲三块大陆出现^[2], 胡子鲇的种类也分布于非洲和亚洲的不同气候环境。虽然鱼类的气呼吸器官只是鳃呼吸的辅助器官, 没有完全退化的鳃, 胡子鲇鳃上器的呼吸上皮与其鳃小片的结构很相似, 两者都由支持细胞把相邻毛细血管分开, 都有黏液细胞, 证明鳃上器由鳃演化而来。在胚胎时期, 鳃由咽部后端两侧发生, 起源于内胚层, 这与泥鳅的气呼吸肠上皮是一样。再从细微结构看, 鱼类气呼吸器官的呼吸上皮细胞、气血屏障以及微绒毛、板层体、内质网和线粒体等细胞器与高等哺乳动物的肺泡上皮有极其相似的结构。许多具有鳔呼吸或者类似鳔的肺鱼类(*Lepidosiren*、*Protopterus*、*Neoceratodus*) 的研究表明陆生脊椎动物肺的起源与鱼类的鳔有一定关系。从个体发育看, 气呼吸器官的出现较早^[2], 苏氏 鲇的鳔是在孵化后的第 5 天由食道的背面突起产生, 并在 12—14d 出现具有气体交换功能的呼吸上皮^[3]。攀鲈(*Anabas testudineus*) 的鳃上器呼吸功能出现在孵化后 13—14d^[18]。尽管胡子鲇、月鳢、泥鳅的鳃和苏氏 鲇一样都是完好的, 但它们进行两种呼吸方式是必要的, 当水中氧气不足, 气呼吸频率就加快。在水中氧气充足时, 气呼吸行为也是必需的, 如果阻止它们的水面活动, 这些鱼类便会窒息死亡^[19]。当然, 鱼类的气呼吸器官种类很多, 除了以上类肺鳔、鳃上器和肠上皮外, 还有鳗鲡的皮肤、黄鳝的口腔黏膜、甲鲇科(*Loricariidae*) 和美洲鲇科(*Trichomy-*

teridae) 的一些用胃上皮进行气呼吸种类等^[19]。为了登陆, 水中的远古鱼类身体的某些部位演化成能适应陆生生活环境的气呼吸器官, 如肺就是其中被陆生脊椎动物保留下来的主要呼吸器官。

参考文献:

[1] Pan J H, Liu C H, Zheng W B, et al. The morphological structure of the swim bladder of *Pangasius sutchi* and its air breathing [J]. *Zoological Research*, 1988, **9**: 88—92 [潘炯华, 刘成汉, 郑文彪, 等. 苏氏 的鳔的形态结构和气呼吸习性 [J]. 动物学研究. 1988, **9**: 88—92]

[2] Maina J N. The morphology of the lung of the African lungfish, *Protopterus aethiopianus* [J]. *Cell Tissue Res*, 1987, **250**: 191—196

[3] Liu W S. Development of the respiratory swimbladder of *Pangasius sutchi*. [J]. *J Fish Biology*, 1993, **42**: 159—167

[4] Zheng W B, Liu W S Morphology and histology of the swimbladder and ultrastructure of respiratory epithelium in the air breathing catfish, *Pangasius sutchi* (Pangasiidae). [J]. *J Fish Biol*, 1988, **33**: 147—154

[5] Fang Z Q, Zheng W B, Xiao Z, et al. Observation on the fine structure of the gill in *Pangasius sutchi*. [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2001, **25**: 489—491 [方展强, 郑文彪, 肖智, 等. 苏氏 鲶鳃超微结构观察 [J]. 水产学报, 2001, **25**: 489—491]

[6] Zheng W B, Pan J H, Liu W S. Studies on the histological structure of swimbladder and ultramicroscopic structure of respiratory epithelium in *Pangasius sutchi*. [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1988, **12**: 163—168 [郑文彪, 潘炯华, 刘文生. 苏氏 鲶鳔的组织学及呼吸上皮的超微结构的研究 [J]. 水生生物学报. 1988, **12**: 163—168]

[7] Hughes G M, Datta Munshi J S Nature of the air breathing organs of the Indian fishes *Channa*, *Amphipnous*, *Clarias* and *Sacabranhus* as shown by electron microscopy. [J]. *Zool Lond*, 1973, **170**: 245—270

[8] Maina J N and Maloiy G M O. The morphometry of the lung of the African lungfish(*Protopterus aethiopianus*): its structural functional correlations. [J]. *Proc R Soc Lond B*, 1985, **224**: 399—420

[9] Zheng Wenbiao, Pan Jionghua and Liu Wensheng. Culture of Catfish in China [J]. *Aquaculture*, 1988, **75**: 35—44

[10] Maina J N, Maloiy G M O. The morphology of the respiratory organs of the African air breathing catfish(*Clarias mossambicus*): A light, electron and scanning microscopic study, with morphometric observations. [J]. *Zool Lond*, (A) 1986, **209**: 421—445

[11] Lu X Y, Huang Z X, and Wang Q. Electron microscopic observations of alveoli development and alveolar epithelium differentiation of mouse lung [J]. *Anat Res*, 2000, **22**: 10—12 [卢晓晔, 黄中新, 王楠. 小鼠肺泡发育与肺泡上皮细胞分化的电镜观察 [J]. 解剖学研究, 2000, **22**: 10—12]

[12] Adamson, Ian Y, Linda Yong Alveolar type II cell growth on a put monary endothelial extracellular matrix [J]. *Am J Physiol*, 1996, **270** (Lung Cell Mol Physiol. **14**): L1017—L1022

[13] Qu Fan Bu Zhan. New function of alveolar type II epithelial cells—defend to lung injury and adjust alveoli immunity. [J]. *Introduction Japanese Medicine*. 1997, **18**: 26—27 [諏访部章. 肺泡II型上皮细胞的新功能—对肺损伤的防御和肺泡免疫调节. 日本医学介绍. 1997, **18**: 26—27 (杨友竹译)]

[14] Wright J R. Clearance and recycling of pulmonary surfactant [J]. *Am J Physiol*, 1990, **259**: L1—12

[15] Jeffrey G, Ramasubhareddy D, Anil B Mukherfee. Surfactant producing rabbit pulmonary alveolar type II cells synthesize and secrete an antinflammatory protein, uteroglobin. [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 1992, **189**: 662—669

[16] Bai Niao Zheng Dian Ta. The fiberated lung ang alveolar type II epithelial cells. [J]. *Introduction Japanese Medicine*. [白鸟正典他. 肺的纤维化与肺泡II型上皮细胞 [J]. 日本医学介绍. 1999, **20**: 564—565]

[17] Mehan C. An electron microscope study of the respiratory epithelium in the lungs of the fire salamander(*Salamandra salamandra*). [J]. *Anat*, 1979, **128**: 215—224

[18] Hughes G M, Datta Munshi J S, and Ojha J. Post embryonic development of water and air breathing organs of *Anabas testudineus* (Bloch). [J]. *J Fish Biol*, 1986, **29**: 443—450

[19] Morris W. Browman and Donald L. Kramer. *Pangasius sutchi* (Pangasiidae), an air beathing catfish that uses the swimbladder as an accessory respiratory organ [J]. *Copeia*, 1985, **4**: 994—998

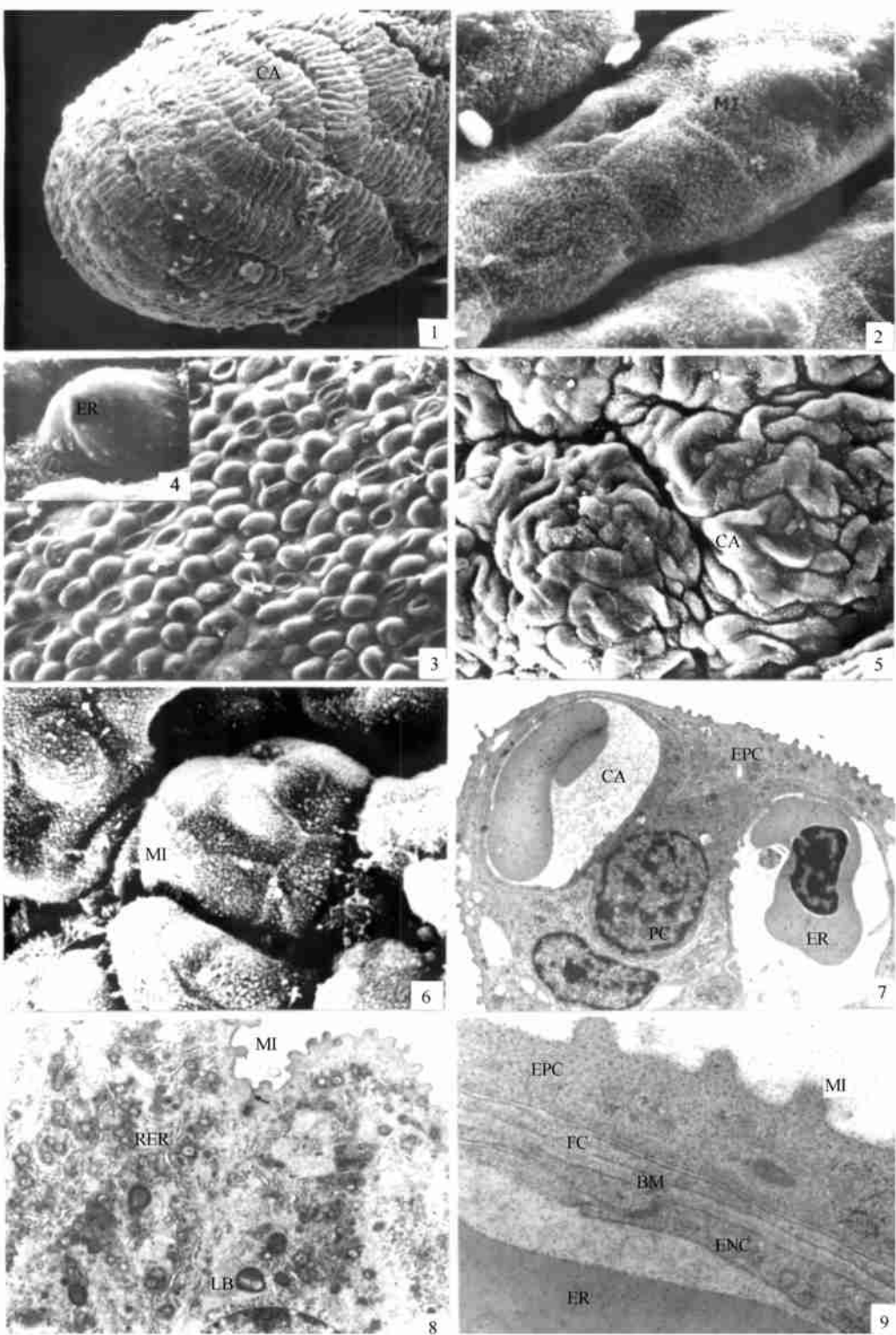
AN ELECTRON MICROSCOPIC STUDY OF THE RESPIRATORY EPITHELIUM
IN THE AIR RESPIRATION ORGANS OF *CLARIAS FUSCUS*,
CHANNA ASIATICA AND *MISGURNUS ANGUILLICAUDATUS*

LIU Wen Sheng and WANG Feng Lin

(Department of Aquaculture, College of Animal Science, South China Agricultural University,
Guangzhou, 510642)

Abstract: The structure of the air respiratory organs of the fishes, *Clarias fuscus* with arborescent organs, *Channa asiatica* with ear-shaped labyrinthine organs and *Misgurnus anguillicaudatus* with air respiratory intestines has been investigated by scanning and transmission electron microscopy. The result suggests that the air respiratory organs are covered by a highly vascularized respiratory epithelium on the surface in all three freshwater species. In *C. fuscus*, the surface of the respiratory epithelium is corn like. The semicircle cobblestone shaped protrusions are present on the surface of the labyrinthine organs in *C. asiatica*. *M. anguillicaudatus* has a cloud shaped surface in its inner wall of the intestines. All respiratory epithelial cells of three air respiratory organs are the same type which is a kind of modified squamous epithelial cells. They show the ultrastructural characteristics of both type I and type II epithelial cells of lung alveoli in mammals. At the same time, the blood air barrier is composed of three layers: the thin layer of the extended cytoplasm of respiratory epithelial cells, the thin sheet of cytoplasm of endothelial cells and the basement membrane between them is similar to that of the respiratory organs in other vertebrates.

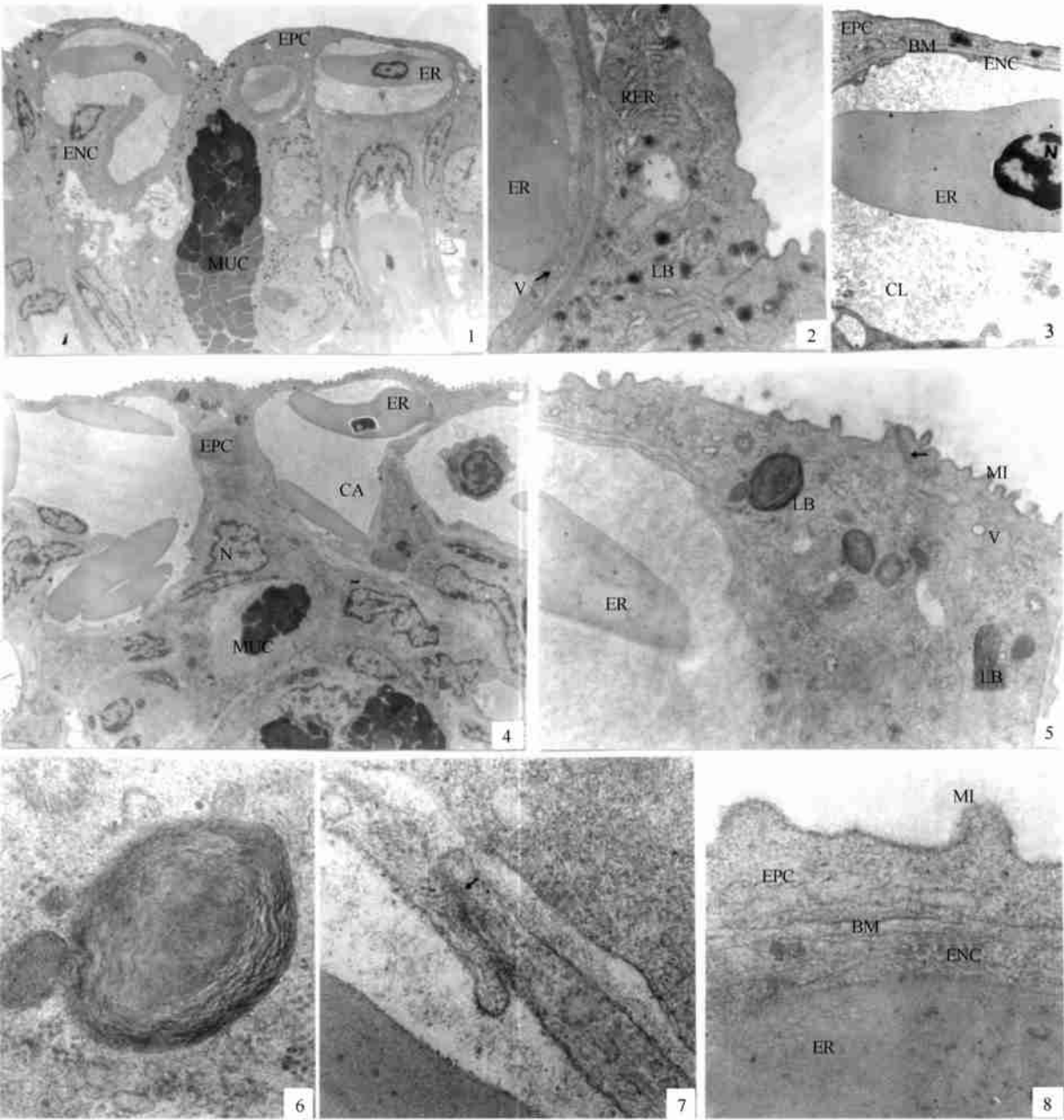
Key words: *Clarias fuscus*; *Channa asiatica*; *Misgurnus anguillicaudatus*; Air respiration; Ultrastructure



图版 I

1—6 扫描电镜照片, 7—9 透射电镜照片。1. 胡子鲇鳃上器枝突, 示毛细血管突起(CA)。× 150; 2. 呼吸上皮表面, 示密集的微绒毛(MI)。× 3, 000; 3. 月鳢鳃上器表面, 示鹅卵石状突起。× 700; 4. 局部放大, 示突起中心表面光滑及毛细血管内红细胞(ER)外撑的轮廓。× 3, 000; 5. 泥鳅的肠上皮, 示云朵状的呼吸上皮表面, 毛细血管突起(CA)。× 1, 000; 6. 局部放大, 示上皮细胞密生的短微绒毛(MI)。× 3, 000; 7. 胡子鲇呼吸上皮横切面, 示上皮细胞(EPC), 毛细血管(CA), 红细胞(ER), 支持细胞(PC)。× 5, 000; 8. 上皮细胞局部放大, 示丰富的板层体(LB), 粗面内质网(RER), 微绒毛(MI), 胞间紧密连接(↑)。× 15, 000; 9. 胡子鲇的气血屏障, 从外到内为上皮细胞(EPC)、结缔组织细胞质延伸(FC)、基底膜(BM)、内皮细胞(ENC), ER为红细胞。× 30, 000

1—6 SEM: 7—9 TEM. 1. A branch of arborescent organs of *C. fuscus*, showing the capillaries(CA). × 150; 2. The respiratory epithelium surface, showing dense microvilli(MI). × 3, 000; 3. SEM of the labyrinthine organ of *C. asiatica* showing cobblestone shaped protrusion × 700; 4. Higher magnification showing the smooth protrusion and the outline of the erythrocyte(ER). × 3, 000; 5. *M. anguillicaudatus*: the intestine showing cloud shaped surface of the respiratory epithelium, capillaries(CA). × 1, 000; 6. Higher magnification showing the dense short microvilli(MI). × 3, 000; 7. *C. fuscus*: Transverse section of respiratory epithelium showing



图版 II

1—8 透射电镜照片。1. 月鳢呼吸上皮横切面, 示上皮细胞(EPC), 内皮细胞(ENC), 红细胞(ER), 黏液细胞(MUC)。× 2,500; 2. 局部放大, 示胞质内的板层体(LB)、粗面内质网(RER), 红细胞(ER), 内皮细胞内的胞饮小泡(V)。× 12,000; 3. 气血屏障, 由上皮细胞胞质薄层(EPC)、基底膜(BM)、内皮细胞胞质薄层(ENC)组成。ER 红细胞, N 红细胞核, CL 毛细血管腔。× 6,450; 4. 泥鳅呼吸上皮横切面, 示上皮细胞(EPC)、毛细血管(CA), 红细胞(ER), 细胞核(N), 黏液细胞(MUC)。× 2,500; 5. 上皮细胞放大, 示板层体(LB), 微绒毛(MI), 空泡(V), 红细胞(ER), 紧密连接(↑)。× 12,000; 6. 高倍放大的板层体。× 50,000; 7. 内皮细胞胞质薄层放大, 示紧密连接(↑)。× 60,000; 8. 泥鳅的气血屏障, 包括上皮细胞胞质薄层(EPC), 基底膜(BM), 内皮细胞胞质薄层(ENC), ER 红细胞, MI 微绒毛。× 60,000

1—8 TEM. 1. *C. asiatica*: Transverse section of respiratory epithelium showing epithelial cells (EPC), endothelial cells (ENC), erythrocyte (ER), mucous cells (MUC). × 2,500; 2 Higher magnification showing multilamellate bodies (LB), rough endoplasmic reticulum (RER), erythrocyte (ER), vesicles (V). × 12,000; 3 The blood-air barrier composed by the thin layer of epithelial cells (EPC), basement membrane (BM) and the extension of the endothelial cell (ENC). ER, erythrocyte, N, nucleus, CL, capillary lumen. × 6,450; 4. *M. anguillicaudatus*: Transverse section of the respiratory epithelium showing epithelial cells (EPC), capillaries (CA), erythrocyte (ER), nucleus (N), mucous cells (MUC). × 2,500; 5 Higher magnification of an epithelial cell multilamellate bodies (LB), microvilli (MI), vesicles (V), erythrocyte (ER), tight junction (arrow). × 12,000; 6. A high power view of the multilamellate bodies. × 50,000; 7. Enlarged view of thin layers of two endothelial cells showing the tight junction (arrow). × 60,000; 8. The blood air barrier of *M. anguillicaudatus*. thin layer of epithelial cells (EPC), basement membrane (BM), thin layer of endothelial cell (ENC), erythrocyte (ER), microvilli (MI). × 60,000

epithelial cells (EPC), capillaries (CA), erythrocyte (ER), pillar cells (PC) × 5,000; 8 Enlarged view of an epithelial cell showing osmiophilic multilamellate bodies (LB), rough endoplasmic reticulum (RER), microvilli (MI), tight junction (arrow) × 15,000; 9. *C. fuscus*: The blood air barrier. Note an epithelial cell (EPC), thin flange of a connective tissue cell (FC), basal lamina (BM) and an endothelial cell (ENC), MI, microvilli, ER, erythrocyte × 30,000