



3 种淡水布纹藻(硅藻纲)的超微结构研究

艾娟, 刘冰*, 李燕, 贺文惠, 汤众森

(吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南吉首 416000)

摘要: 该研究利用光学和扫描电子显微镜对 3 种淡水布纹藻(钝布纹藻、库氏布纹藻和赛欧托布纹藻)的形态学进行了研究, 以明确它们的精细结构特征; 并分析讨论它们在中国的地理分布区域。结果表明: (1) 3 种淡水布纹藻皆属于粗糙布纹组; 从壳面观看, 都具有 S 形和反 S(2)形两种壳瓣外形。(2) 钝布纹藻具有弱的 S 形壳面外形、T 形的外近端壳缝末稍和直的内近端壳缝末稍以及椭圆形的中央区; 库氏布纹藻具有明显的 S 形壳面外形、略微向不同侧偏转的外近端壳缝末稍和直的内近端壳缝末稍以及椭圆形的中央区; 赛欧托布纹藻具有弱的 S 形壳面外形、强烈钩状的外近端壳缝末稍和 T 形的内近端壳缝末稍以及倾斜的中央区。(3) 钝布纹藻在广东、广西、湖南、四川和云南等地有分布; 库氏布纹藻在新疆和湖南等地有发现; 赛欧托布纹藻分布于武陵山区, 该文是其在我国淡水分布的首次报道。

关键词: 布纹藻属; 洞庭湖; 壳缝末稍; S 形; 武陵山区

中图分类号: Q949.27⁺1 **文献标志码:** A

Ultrastructure of Three Freshwater Species of *Gyrosigma* (Bacillariophyceae)

AI Juan, LIU Bing*, LI Yan, HE Wenhui, TANG Zhongsen

(College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: A morphology study is carried out on three freshwater species of *Gyrosigma* (*Gyrosigma obtusatum*, *G. kuetzingii* and *G. sciotoense*) using light and scanning electric microscopy to demonstrate their fine structural characters, and the regions of their geographical distribution in China are also summarized. The results show that: (1) all three species belong to the section Strigiles and all present two types of valve outline in valve view: S-shaped and reverse S-shaped (2-shaped); (2) *G. obtusatum* has weakly sigmoid valve outline, T-shaped external proximal raphe fissures, straight internal proximal raphe ending, and elliptic central area; *G. kuetzingii* bears distinctly sigmoid valve outline, external proximal raphe fissures which slightly deflect towards different sides, straight internal proximal raphe ending, and elliptic central area; and *G. sciotoense* possesses also weakly sigmoid valve outline, strongly hooked external proximal raphe fissures, T-shaped internal proximal raphe fissures, and oblique central area; (3) *G. obtusatum* is found in Guangdong, Guangxi, Hunan, Sichuan and Yunnan; *G. kuetzingii* is found in both Xinjiang and Hunan; and *G. sciotoense* is only discovered in Wuling Mountains, and this is its first report from the freshwater in China.

收稿日期: 2019-05-29; **修改稿收到日期:** 2019-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(31760051); 湖南省自然科学基金(2018JJ2311); 吉首大学校级课题(Jdx1850)

作者简介: 艾娟(1999-), 女, 本科生。E-mail: 1628687410@qq.com

* 通信作者: 刘冰, 博士, 副教授, 主要从事硅藻分类和生态研究。E-mail: jsulb@outlook.com

Key words: *Gyrosigma*; Dongting Lake; raphe fissure; sigmoid; Wuling Mountains

布纹藻属(*Gyrosigma* A. Hassall) 属于双壳缝硅藻类型,大部分种类分布在海洋和咸水生境,少量种类生活于淡水水域。根据 Round 等^[1]的研究总结,布纹藻属的鉴定特征包括以下几个:每个活细胞含有两片盘状质体;或多或少的 S 形壳面轮廓;横向和纵向垂直的双线纹系统;壳缝两边的硅质胸肋从壳面内部看,仅在一侧明显增厚而显得十分发达。根据 AlgaeBase 网站的数据,布纹藻属有 87 个种类在分类学上已被公认^[2]。Peragallo^[3]把布纹藻属的种类在属下分为三组:第一组以渐狭布纹藻 [*Gyrosigma attenuatum* (Kützing) Rabenhorst] 为代表,共有特征是纵向线纹比横向的要粗糙(纵向线纹的密度小于横向的密度);第二组以尖布纹藻 [*Gyrosigma acuminatum* (Kützing) Rabenhorst] 为代表,共有特征是纵向线纹的密度和横向的大约相等;第三组以粗糙布纹藻 [*Gyrosigma strigilis* (W. Smith) J. W. Griffin & Henfrey] 为代表,共有特征是纵向线纹比横向的要精细(纵向线纹的密度大于横向的密度)。本文所研究的 3 个淡水布纹藻种类皆属于第三组。

金德祥等^[4-5]对中国海洋和河口的布纹藻属种类进行了基于光学显微镜的系统调查,其鉴定的种类至今仍有重要参考价值。但是,随着电镜广泛应用于硅藻形态观察,对于硅藻的认识在不断的更新。刘冰等^[6-7]利用光学和扫描电子显微镜的观察,描述了来自厦门湾潮间带的两个海洋布纹藻属新种:喙状布纹藻 (*Gyrosigma rostratum* B. Liu, D. M. Williams & B. Huang) 和厦门布纹藻 (*Gyrosigma xiamenense* B. Liu, F. A. S. Sterrenburg & B. Huang)。对于中国淡水布纹藻的研究,也有一些报道。例如:刘静等^[8]报道了来自珠江水系的 3 个布纹藻种类:渐狭布纹藻、斯氏布纹藻 [*Gyrosigma spencerii* (Smith) Griffith et Henfrey, 现在的有效种名为尖布纹藻,参见 Sterrenburg^[9]] 和刀形布纹藻(现在的有效种名为钝布纹藻 [*Gyrosigma obtusatum* (Sullivant & Wormley)] Boyer, 参见 Sterrenburg^[10])。钝布纹藻还有从云南、四川和广西的报道^[11-13]。林雪如等^[14]报道了来自新疆喀纳斯湖的一种布纹藻:库氏布纹藻 [*Gyrosigma kuetzingii* (Grunow) Cleve]。赛欧托布纹藻 [*Gyrosigma scitoense* (W. S. Sullivant) Cleve] 尚未见有文献报道其在中国淡水的分布。综上所述,中国的布纹藻

属研究需要深化。根据我们几年来积累的资料,本文对 3 种淡水布纹藻进行了全面和彻底的形态学观察,以期能加深对来自中国的淡水布纹藻精细结构和地理分布的认识。

1 材料和方法

硅藻样品从两个地方收集。一部分样品是石附生硅藻。于 2015 年 9 月 30 日采自湖南省桑植县五道水镇旁的澧水河道,取样点坐标为 (27°49′48″N, 108°45′53″E)。赛欧托布纹藻标本来自于本部分样品。取样方法为:用牙刷先将石头表面的硅藻用力刷入塑料盘中,再分几次把塑料盘中的样品洗入 100 mL 的样品瓶中,然后用 70% 的酒精固定,最后密封带回实验室处理。另一部分样品是泥生硅藻,于 2019 年 4 月 20 日采自于湖南省东洞庭湖国家级自然保护区。钝布纹藻和库氏布纹藻标本来自于本部分样品。取样方法为:选择邻接水体的黄褐色土壤,每次刮取少许表层 1~2 mm 深的土壤,每个样点刮取不少于 10 次,刮取的表层土壤总体积不超过 20 mL。其他处理与前面石附生硅藻样品相同。

在实验室先用 10% 的 HCl 溶解掉要处理样品中含钙的固体化合物,然后加入两倍要处理硅藻样品体积的 30% H_2O_2 溶液,在 80 °C 下温和加热 6 h 以氧化去掉硅藻细胞的有机物,最后用蒸馏水清洗 5 次得到干净的硅藻标本。利用 Naphrax® 封装剂制成永久装片以供光学显微镜观察和拍照(德国徕卡光学显微镜,型号 Leica DM3000)。永久装片标本各 10 张保存在吉首大学植物标本馆,编号分别为 JSUD2019-0001—0010 (钝布纹藻)、JSUD2019-0011—0020 (库氏布纹藻) 和 JSUD2019-0020—0030 (赛欧托布纹藻)。扫描电镜观察在湖南怀化学院完成(德国卡尔蔡司场发射扫描电子显微镜,型号 Sigma HD)。

本研究鉴定依据的主要参考文献为 Sterrenburg^[10] 和 Cantonati 等^[15]。本文主要硅藻形态学术语中英文对照如下:壳体(frustule),上壳瓣(epivalve),下壳瓣(hypovalve),壳环带(girdle elements or girdle bands),壳瓣(valve),壳面(valve face),胸肋(sternum),近端壳缝末稍(proximal raphe fissure or central raphe fissure),远端壳缝末稍(distal raphe fissure or terminal raphe fissure),狭缝隙状 slit-like),膜(hymen),中央区(central area),中

央节(central nodule),喇叭舌(helictoglossa),顶孔区(apical pore field),末端无纹区(terminal area)。

2 种类描述与鉴定

2.1 钝布纹藻[*Gyrosigma obtusatum* (Sullivant & Wormley) Boyer] (图版 I, 1~12)

同义名:刀形布纹藻[*Gyrosigma scalproides* (Rabenhorst) Cleve]

光学显微镜观察显示(图版 I, 1~2):壳瓣弱 S 形,壳面从中间向两端逐渐变窄,末端钝圆,略微偏向不同侧。壳面长 $47\sim 66\ \mu\text{m}$,宽 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。壳缝和壳缝胸肋皆呈 S 形,半段胸肋仅呈现一个弯曲。壳缝末稍在光学显微镜下难以分辨。中央区或多或少有一点偏斜,椭圆形。横向线纹在壳面中部略微辐射排列,在其他部分皆垂直于胸肋。横向线纹密度为 $22\sim 23$ 条/ $10\ \mu\text{m}$,纵向线纹密度更大,光学显微镜下无法区分计数。从壳面观可以看到两种壳瓣外形,一种 2 形(反 S 形,图版 I, 1),一种 S 形(图版 I, 2)。

扫描电子显微镜观察显示(图版 I, 4~12):壳瓣外面观具有两种外形:一种 2 形(图版 I, 3),一种 S 形(图版 I, 5)。壳瓣内面观同样具有这两种外形(图版 I, 4 和 6)。外远端壳缝末稍向不侧弯曲(图版 I, 7 和 9),外近端壳缝末稍呈 T 形(图版 I, 8)。孔纹外侧开口狭缝隙状(图版 I, 7~9)。顶孔区由两列线纹组成,末端无纹区呈三角形(图版 I, 7 和 9)。纵向线纹密度约 $34\sim 38$ 条/ $10\ \mu\text{m}$ 。从壳内面观看,壳缝一侧的胸肋远比另一侧的发达(图版 I, 4, 6, 10~12)。内远端壳缝末稍终止于喇叭舌(图 10 和 12),内近端壳缝末稍直接终止于中央结(图版 I, 11)。孔纹内侧开口被具有极细微孔的膜所覆盖,圆形或椭圆形(图版 I, 10~12)。

2.2 库氏布纹藻[*Gyrosigma kuetzingii* (Grunow) Cleve] (图版 II, 1~10)

光学显微镜观察显示(图版 II, 1~2):壳瓣明显 S 形,壳面从中间向两端迅速变窄,末端钝圆,明显偏向不同侧。壳面长 $80\sim 108\ \mu\text{m}$,宽 $10\sim 13\ \mu\text{m}$ 。壳缝和壳缝胸肋皆呈 S 形,半段壳缝胸肋仅呈现一个弯曲。壳缝末稍在光学显微镜下难以分辨。中央区不倾斜,椭圆形。横向线纹在壳面中部略微辐射排列,在其它部分皆垂直于壳缝胸肋。横向线纹密度为 $20\sim 21$ 条/ $10\ \mu\text{m}$,纵向线纹密度 $27\sim 28$ 条/ $10\ \mu\text{m}$ 。从壳面观可以看到两种壳瓣外形,一种 2 形(图版 II, 1),一种 S 形(图版 II, 2)。

扫描电子显微镜观察显示(图版 II, 3~10):壳瓣外面观具有两种外形:一种 2 形(图版 II, 3),一种 S 形(图版 II, 4)。外远端壳缝末稍向不侧弯曲(图版 II, 5 和 7),外近端壳缝末稍略微向不同侧偏转(图版 II, 6)。孔纹外侧开口狭缝隙状(图版 II, 5~7)。顶孔区由一系列线纹组成,末端无纹区呈三角形(图版 II, 5 和 7)。从壳内面观看,壳缝一侧的胸肋远比另一侧的发达(图版 II, 4, 8~10)。内远端壳缝末稍终止于喇叭舌(图版 II, 8 和 10),内近端壳缝末稍直接终止于中央结(图版 II, 9)。孔纹内侧开口被具有极细微孔的膜所覆盖,圆形或椭圆形(图版 II, 8~10)。

2.3 赛欧托布纹藻[*Gyrosigma sciotoense* (W. S. Sullivant) Cleve] (图版 III, 1~10)

同义名:结节布纹藻[*Gyrosigma nodiferum* (Grunow) Reimer]

光学显微镜观察显示(图版 III, 1~2):壳瓣弱 S 形,壳面从中间向两端逐渐变窄,末端钝圆,略微偏向不同侧。壳面长 $101\sim 145\ \mu\text{m}$,宽 $14\sim 17\ \mu\text{m}$ 。壳缝和壳缝胸肋皆呈 S 形,半段壳缝胸肋有两个弯曲。壳缝末稍在光学显微镜下难以分辨。中央区明显旋转,相对于纵轴呈倾斜状排列,椭圆形或平行四边形。横向线纹在壳面中部略微辐射排列,在其它部分皆垂直于壳缝胸肋。横向线纹密度为 $16\sim 18$ 条/ $10\ \mu\text{m}$,纵向线纹密度 $19\sim 20$ 条/ $10\ \mu\text{m}$ 。从壳面观可以看到两种壳瓣外形,一种 2 形(图版 II, 1),一种 S 形(图版 II, 2)。

扫描电子显微镜观察显示(图版 III, 3~10):壳瓣外面观具有两种外形:一种 2 形(图版 III, 3),一种 S 形(图版 III, 4)。外远端壳缝末稍向不侧弯曲(图版 III, 5 和 7),外近端壳缝末稍呈强烈钩状弯曲(图版 III, 6)。孔纹外侧开口狭缝隙状(图版 III, 5~7)。顶孔区由一系列线纹组成,末端无纹区呈三角形(图版 III, 5 和 7)。从壳内面观看,壳缝一侧的胸肋远比另一侧的发达(图版 III, 4, 8~10)。内远端壳缝末稍终止于喇叭舌(图版 III, 8 和 10),内近端壳缝末稍呈 T 形(图版 III, 9)。孔纹内侧开口被具有极细微孔的膜所覆盖,圆形或椭圆形(图版 III, 8~10)。

3 讨 论

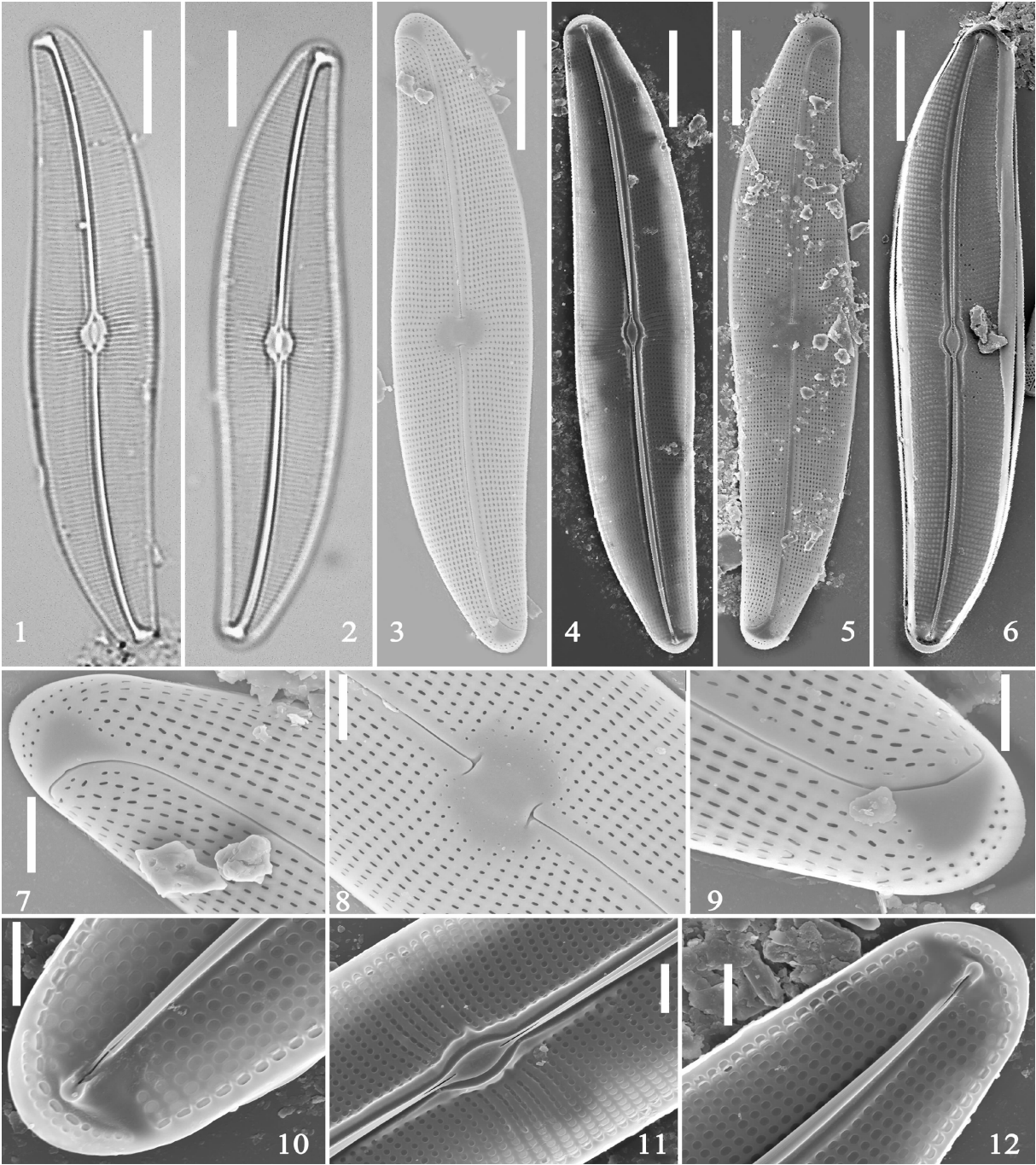
壳藻的壳体是由上壳瓣、下壳瓣和壳环带构成的。硅藻样品经过室内处理之后,一般只有少量的壳体保持完整,绝大部分的壳体解体,即上、下壳瓣分开,或者以外面观面对观察者,或者以内面观面对

观察者。在光学显微镜下几乎不能区分一个观察到的壳瓣是外面观或是内面观。对于布纹藻属的壳瓣来说,它有两种壳面观,即 S 形和2形。刘冰等^[6-7]对此现象进行了证实,本文中的 3 种布纹藻皆有 S 形和2形两种壳瓣外形,这是又一次有力的证明。尽我们所知,很少有其他研究者明确提及这种现象。内外壳缝的末梢形状是一种超微结构,是重要的种类鉴定特征,特别是近端壳缝的形状。本文中钝布纹藻具有外部近端 T 形壳缝末梢和内部近端直壳缝末梢的组合,库氏布纹藻具有外部近端略微偏转的壳缝末梢和内部近端直壳缝末梢的组合(库氏布纹藻与尖布纹藻的壳瓣外形相似,但是前者的横向线纹比纵向的粗糙,而后的横向和纵向线纹密度相

同),赛欧托布纹藻具有外部近端强烈钩状的壳缝末梢和内部近端 T 形壳缝末梢的组合。从这些内外壳缝末梢的组合可以帮助确定一个种类的身份,从而与其他种类加以区分。钝布纹藻在中国分布广泛^[8, 11-13],库氏布纹藻在新疆^[11]和湖南有分布。金德祥等^[4-5]对赛欧托布纹藻有过报道,但是,他们是从海洋环境里发现的,而赛欧托布纹藻是一种淡水硅藻^[10, 15],因此,海洋环境分布赛欧托布纹藻的身份值得怀疑,需要进一步的研究。本文的赛欧托布纹藻样品来自武陵山区的澧水(另外,我们也在沅江支流发现了该物种),这是该种类在中国的第一次淡水分布报道。

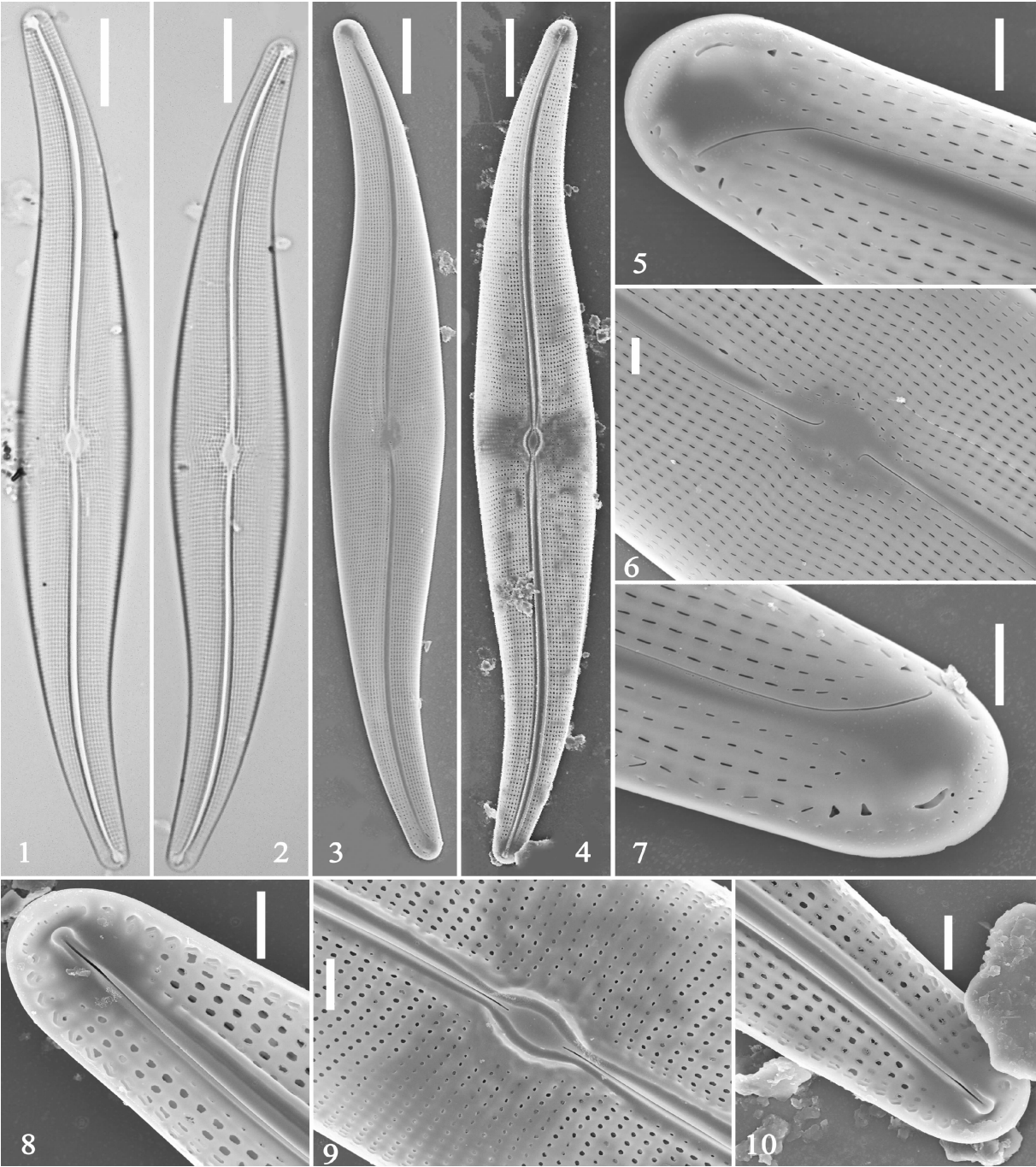
参考文献:

- [1] ROUND F E, CRAWFORD R M, MANN D G. The Diatoms: biology and Morphology of the Genera[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990: 1-747.
- [2] GUIRY M D & GUIRY G M. *AlgaeBase*[M]. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 25 May 2019.
- [3] PERAGALLO H. Monographie du genre *Pleurosigma* et des genres allies[J]. *Le Diatomiste*, 1890/1891,**1**: 1-35.
- [4] 金德祥,程兆第,林均民,等. 中国海洋底栖硅藻类上卷[M]. 北京:海洋出版社,1982: 1-323.
- [5] 金德祥,程兆第,刘师成,等. 中国海洋底栖硅藻类下卷[M]. 北京:海洋出版社,1992: 1-437.
- [6] LIU B, WILLIAMS D M, HUANG B Q. *Gyrosigma rostratum* sp. nov. (Bacillariophyta) from the low intertidal zone, Xiamen Bay, southern China[J]. *Phytotaxa*, 2015,**203**(3): 254-262.
- [7] LIU B, STERRENBURG F A S, HUANG B Q. *Gyrosigma xiamenense* sp. nov. (Bacillariophyta) from the middle intertidal zone, Xiamen Bay, southern China [J]. *Phytotaxa*, 2015,**222**(4): 259-266.
- [8] 刘 静,韦桂峰,胡 韧,等. 珠江水系东江流域底栖硅藻图集[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 1-108.
- [9] STERRENBURG F A S. Studies on the genera *Gyrosigma* and *Pleurosigma* (Bacillariophyceae): *Gyrosigma acuminatum* (Kützting) Rabenhorst, G. spenceri (Quekett) Griffith, and *G. rautenbachiae* Chohnoky[J]. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 1995, 146: 467-480.
- [10] STERRENBURG F A S. Studies on the genera *Gyrosigma* and *Pleurosigma* (Bacillariophyceae)[J]. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 1994, 145: 217-236.
- [11] 倪依晨. 中国西南山区硅藻研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2014.
- [12] 刘 琪. 四川若尔盖湿地及其附近水域硅藻的分类及生态研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [13] 李明月. 广西壮族自治区(崇左地区)双壳缝目(Biraphidinales)硅藻的初步研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [14] 林如雪, PATRICK RIOUAL, 白志娟, 等. 喀纳斯湖硅藻的中国新记录种及现生种属调查[J]. 水生生物学报, 2018,**42**(3): 641-744.
- [15] LIN R X, RIOUAL P, BAI Z J, *et al.* The Recent Diatom Flora in Lake Kanas, Xinjiang: Unusual Species and New Records in China[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018,**42**(3): 641-744.
- [15] CANTONATI M, KELLY M G & LANGE-BERTALOT H. Freshwater Benthic Diatoms of Central Europe[M]. Germany: Koeltz Botanical Books, 2017: 1-908.



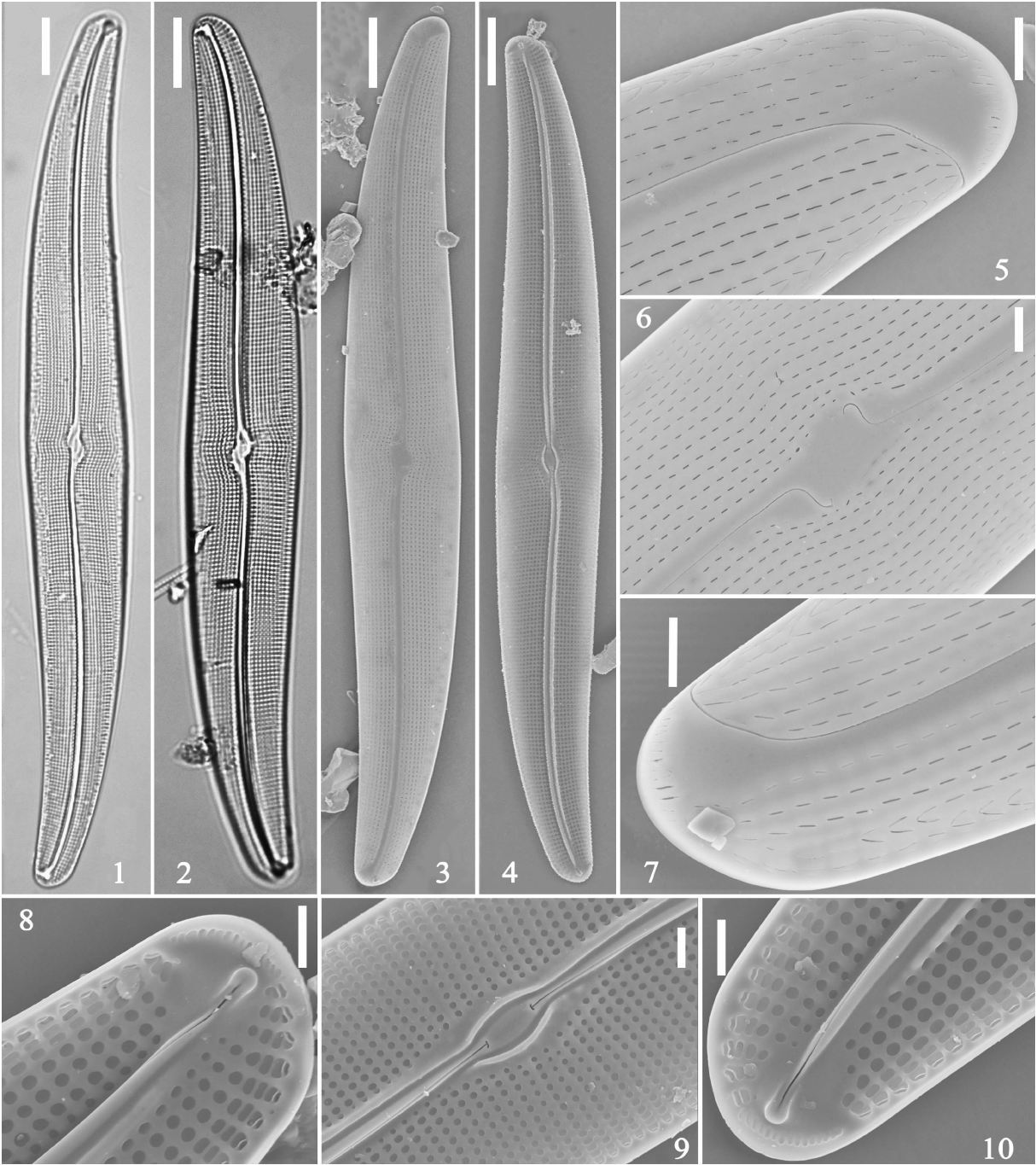
图版 I 钝布纹藻光学显微镜观察(1~2)和扫描电子显微镜观察(3~12)
1~2. Z形和 S形两种壳瓣外形;3~6. Z形和 S形两种壳瓣外形;7~9. 展示图 3 的壳面细节;10~12. 展示图 4 的壳面细节。
图 1~6 标尺为 10 μm ; 图 7~12 标尺为 2 μm

Plate I *Gyrosigma obtusatum*, LM (1–2), SEM (3–12)
Figs. 1–2. Two valve outlines of Z-shaped and S-shaped; Figs. 3–6. Two valve outlines of Z-shaped and S-shaped; Figs. 7–9. Details of Fig. 3; Figs. 10–12. Details of Fig. 4. Scale bar = 10 μm (Figs. 1–6), 2 μm (Figs. 7–12)



图版 II 库氏布纹藻光学显微镜观察(1~2)和扫描电子显微镜观察(3~10)
1~2. 2形和 S 形两种壳瓣外形;3~4. 2形和 S 形两种壳瓣外形;5~7. 展示图 3 的壳面细节;8~10. 展示图 4 的壳面细节。
图 1~4 标尺为 10 μm ; 图 5~10 标尺为 2 μm

Plate II *Gyrosigma kuetzingii*, LM (1–2), SEM (3–10)
Figs. 1–2. Two valve outlines of 2-shaped and S-shaped; Figs. 3–4. Two valve outlines of 2-shaped and S-shaped; Figs. 5–7. Details of Fig. 3; Figs. 8–10. Details of Fig. 4. Scale bar = 10 μm (Figs. 1–4), 2 μm (Figs. 5–10)



图版Ⅲ 赛欧托布纹藻光学显微镜观察(1~2)和扫描电子显微镜观察(3~10)
1~2. Z形和S形两种壳瓣外形;3~4. Z形和S形两种壳瓣外形;5~7. 展示图3的壳面细节;8~10. 展示图4的壳面细节。
图1~4标尺为10 μm; 图5~10标尺为2 μm

Plate III *Gyrosigma sciotoense*, LM (1–2), SEM (3–10)
Figs. 1–2. Two valve outlines of Z-shaped and S-shaped; Figs. 3–4. Two valve outlines of Z-shaped and S-shaped; Figs. 5–7. Details of Fig. 3; Figs. 8–10. Details of Fig. 4. Scale bar =10 μm (Figs. 1–4), 2 μm (Figs. 5–10)

(编辑:潘新社)