



•综述•

典型红树林生态系统藻类多样性及其在生态过程中的作用

高 宇^{1,2,3} 林光辉^{1,2,3*}

1 (清华大学地球系统科学系地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084)

2 (全球变化与中国绿色发展协同创新中心, 北京 100875)

3 (清华大学深圳研究生院海洋科学与技术学部, 广东深圳 518055)

摘要: 藻类是红树林生态系统重要的生物类群, 根据生态习性可分为浮游植物、底栖微藻和大型藻类三个生态类群, 它们在红树林生态系统生物多样性、初级生产、元素循环等方面起着重要作用。但在红树林生态系统中, 关注重点多集中在红树植物和动物, 对其中的藻类重视不够, 且多数研究集中在近20年以及亚洲的红树林区。事实上, 红树林生态系统藻类非常丰富, 其多样性研究有助于深入揭示红树林生态系统的结构与功能。本文介绍了红树林生态系统藻类的组成类群及其重要性, 重点对红树林区浮游植物、底栖硅藻和大型海藻的种类组成、地理分布及其与初级生产力、水质污染、元素循环、碳库形成等生态过程中的作用的研究动态和进展等进行了总结。根据已有研究, 红树林区浮游植物和底栖硅藻的种类数一般为几十到上百种, 其中硅藻在种类和数量上都占绝对优势, 它们是重要的初级生产者、饵料生物和水质污染指示生物; 红树林区底栖大型藻类主要由红藻、绿藻、褐藻、蓝藻组成, 绿藻的种类较多, 红藻在数量上占优势; 藻类是红树林湿地碳库的重要贡献者, 在红树林湿地生态系统碳汇和碳循环中起重要作用。红树林生态系统是个高度动态和异质的系统, 今后应加强红树林藻类多样性的长周期、大尺度变化及不同生境藻类的综合研究, 关注大陆径流和潮汐对藻类多样性和蓝碳的影响, 借助沉积物藻类记录, 探明红树林区藻类的长周期变化, 反演气候变化和人类活动对红树林生态系统的影响过程和机制。

关键词: 浮游植物; 底栖藻类; 红树林区; 种类组成; 地理分布

Algal diversity and their importance in ecological processes in typical mangrove ecosystems

Yu Gao^{1,2,3}, Guanghui Lin^{1,2,3*}

1 Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084

2 Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875

3 Division of Marine Sciences & Technology, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055

Abstract: Algae are important flora in mangrove ecosystems. Algae can be divided into three ecological groups, namely phytoplankton, benthic microalgae, and macroalgae in mangrove ecosystems, which play important roles in organic carbon production and nutrient cycle. Despite the importance of algae for ecosystem function, studies of mangrove ecosystems have focused on higher plants and animals, with few studies of algae. Due to their abundance in mangrove ecosystems, studies of algae can broaden our understanding about the structure and function of mangrove ecosystems. In this review, we first briefly introduce algal groups and their ecological importance in mangrove ecosystems. Then, we emphasize species composition and geographical distribution of phytoplankton, benthic diatoms and macroalgae, and their importance in key ecological processes such as primary production, water pollution, element cycle, and carbon stock dynamics

收稿日期: 2018-03-19; 接受日期: 2018-05-18

基金项目: 科技部基础资源调查专项(2017FY100703)、全球变化重大研究计划项目(2013CB956600)、国家海洋局公益性行业科研专项(201305021)和深圳市基础研究项目(JCYJ201505291649187360)

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: lingh@tsinghua.edu.cn

in mangrove ecosystem. The researches have showed that the species number of phytoplankton and benthic diatoms in mangroves varied from dozens to hundreds, and diatoms are dominant both in species composition and abundance, which are important primary producer, animal food, and pollution indicator. Macroalgae are mainly composed of red algae, green algae, brown algae and blue-green algae. Green algae are dominant in species richness whereas red algae are abundant in quantity. Algae contribute significantly to the carbon pool by sequestering and cycling carbon. We propose that future studies should focus on algal diversity and its role in ecological processes in mangrove ecosystems. Furthermore, we suggest that studies of algae should be part of comprehensive investigations on long-term ecosystem dynamics. The influence of continental runoff and tidal patterns on algal diversity and blue carbon dynamics in mangrove areas also deserve more attention, on account of being directly related to nutrient replenishment and dynamics. Since algal diversity in mangrove sediment is influenced by physico-chemical and biological condition of the system, it could be used as an indicator of climate change and effects of anthropogenic activity on mangrove ecosystems.

Key words: phytoplankton; benthic algae; mangrove forest; species composition; geographical distribution

在热带和亚热带地区的沿岸与河口生态系统中,由红树林、海草与藻类组成的海洋植物群落起着极其重要的作用,这些生物群落为动物尤其是一些幼小动物提供了生活和庇护场所及重要的食物来源,并成为许多动物的繁殖场所;另一方面,它们还能吸收营养物质,促进养分循环(Bandeira, 1995),在沿岸与河口生态系统物质循环和能量流动中起着重要的作用。

红树植物是热带、亚热带海洋潮间带的木本植物,是海岸和河口湿地生态系统重要的初级生产者之一(林鹏, 1984)。世界上的红树林主要分布在南北回归线之间,从25° N 到25° S (王文卿和王瑁, 2007)。中国的红树林主要分布在海南、广东、广西、福建、台湾、浙江、香港和澳门,从18° N断续延伸到28° N (Li & Lee, 1997; 王文卿和王瑁, 2007)。红树林生境复杂多样,为各种各样的陆生和海洋生物提供了适宜的生活环境和丰富的饵料,因此,红树林区的生物多样性很高(Kathiresan, 2000; Kathiresan & Bingham, 2001)。例如在印度东南部的Pichavaram红树林区,除了有13种红树外,还发现有819种其他生物,包括82种浮游植物、22种海藻和3种海草(Kathiresan, 2000)。中国红树林湿地面积仅为239 km²,但已记录的生活于其中的生物有2,854种,所以,中国红树林湿地单位面积的物种丰度是海洋平均水平的1,766倍(何斌源等, 2007)。

作为红树林区初级生产者之一的藻类是红树林生境中重要的生物群落,也是许多海洋生物重要的食物来源,是红树林生态系统重要的食物链组成部分。例如红树林区水体中的浮游植物是海洋动物

尤其是海洋动物幼虫和幼体的直接饵料(陈长平等, 2002; Biswas et al, 2010; Alikunhi & Kathiresan, 2012; Arumugam et al, 2016)。

红树林下的生境与开阔无林地潮间带和开放水体的生境有很大的不同。由于高大的红树植物的遮荫作用,林下的生境一般光线都比较弱,因此其中生活的藻类与无红树植物遮荫的开阔区域种类组成不同,个体也普遍较小(刘维刚等, 2001)。另一方面,红树林区由于同时受陆地径流输入和潮汐的影响,理化因子变化大,因此,其藻类的种类组成也有其特殊性。

红树林区的藻类根据生态习性可划分为浮游藻类(planktonic algae)和底栖藻类(benthic algae)。浮游藻类主要由浮游植物组成,底栖藻类是指在底泥或其他基质中生活的藻类,大多营附着生活,主要由底栖微藻(benthic microalgae)和大型海藻(seaweed or macroalgae)组成。由于潮汐和风浪的作用,一些底栖微藻(主要是底栖和附着硅藻)也经常大量出现在水体中。也有人根据藻类大小把红树林区藻类分为大型藻类(macroalgae)和微型藻类(microalgae)。大型藻类主要由大型海藻构成,微型藻类包括浮游植物和底栖微藻(Kathiresan & Bingham, 2001; 何斌源等, 2007)。

由于生境特殊,红树林区的藻类不仅多样性高,对近岸水域次级生产有促进作用,而且具有多种生态功能(刘玉和陈桂珠, 1997; 刘玉等, 2006; Choudhury et al, 2015; Pham, 2017; Shoaib et al, 2017)。探讨红树林区的藻类多样性与生态作用有助于阐明红树林生态系统的独特生态功能及在河口

海岸物质循环和能量流动中的重要作用。

1 红树林区的浮游植物

1.1 浮游植物对红树林区生产力的贡献

浮游植物是红树林生态系统中除红树植物、底栖藻类外的一类重要初级生产者,也是动物的直接或间接的饵料(林鹏, 1984)。在东南亚、澳大利亚、美国中部地区和南美热带地区,浮游植物在河口生产力总值中所占比例相对较小。Robertson和Blaber (1992)认为,浮游生物在红树林生境的生产力总值中占20–50%之间。在巴布亚新几内亚Fly River Delta的红树林河口,浮游植物占到总生产力的20% (Robertson et al, 1991, 1992),在印度南部的Pichavaram占到了20–22% (Kathiresan, 2000)。相对于附近的河口和浅海环境,红树林水体肥沃,营养水平高,浮游植物和其他生物资源的生产力也较高,总初级生产力是 $8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,其中大约21%是由5–10 μm 大小的浮游植物提供的。尽管在红树林生态系统中浮游植物生产力所占比例相对较低,但其物种多样性却相对较高。

1.2 国外红树林区浮游植物多样性研究

红树林区浮游植物具有较高的物种多样性。表1总结了近年来国外对不同红树林区浮游植物种类多样性的研究结果。可以看出,不同地理位置的红树林区的浮游植物种类组成存在较大的差异。例如在孟加拉国Sundarbans红树林9个样点只观察到36种浮游植物,分别是硅藻30种、绿藻3种、裸藻2种、黄藻1种(Aziz et al, 2012);在印度东南部的Pichavaram红树林中发现了82种浮游植物,其中硅藻67种(82%),甲藻12种(15%),蓝藻3种(Kannan & Vasantha, 1992);而Aké-Castillo和Vazquez (2008)在对墨西哥瀉湖红树林区的浮游植物多样性研究中则鉴定到了179种浮游植物,其中硅藻134种,甲藻20种,绿藻10种,蓝藻9种,裸藻2种,其他鞭毛藻4种,种类较丰富。

红树林区浮游植物多样性除了存在地理上的差异,也存在时间上的差异。例如在印度东南部的Pichavaram红树林区在1985年采集的样品中共鉴定到了82种浮游植物(Kannan & Vasantha, 1992),但在2002–2003年采集的样品中则鉴定到了94种浮游植物,包括硅藻73种,甲藻15种,绿藻2种,蓝藻3种,金藻1种(Rajkumar et al, 2009)。从表1的比较也可以

看出,在近十几年间印度Pichavaram红树林区藻类的种类和多样性都呈现增加趋势。

许多研究表明,硅藻是红树林区浮游植物的主要类群,在种类和数量上都占优势。例如Pham (2017)在越南Can Gio红树林保护区所鉴定到的126种浮游植物中,硅藻占99种,细胞数量占76.4%。在其他红树林区浮游植物研究中也类似的现象(如Aké-Castillo & Vazquez, 2008; Canini et al, 2013; Arumugam et al, 2016; Shoaib et al, 2017)。

目前关于红树林区浮游植物多样性研究的主要特点有:(1)研究区域主要集中在亚洲,例如印度、菲律宾、孟加拉国、越南、巴基斯坦等。(2)不同红树林区浮游植物的种类数存在较大差异,从几十种到上百种(25–295种)。这一方面与不同地理环境的差异有关,另一方面与研究强度、采样频率、种类鉴定的水平等人为因素也有一定关系;(3)硅藻是红树林区浮游植物的主要组成类群,其种类数所占比例大都在70–90%之间;最近有人采用*rbcl*基因序列对红树林区浮游植物的分析结果也证实了硅藻是主要成份(在525个克隆中占485个)(Samanta & Bhadury, 2014);(4)浮游植物优势种也主要由硅藻组成,如角毛藻属(*Chaetoceros*)、海链藻属(*Thalassiosira*)、骨条藻属(*Skeletonema*)、圆筛藻属(*Coscinodiscus*)、菱形藻属(*Nitzschia*)、斜纹藻属(*Pleurosigma*)是红树林区浮游植物的常见硅藻属(陈坚等, 1993; 陈长平, 2004; 王雨等, 2009)。在印度东南部的Pichavaram红树林区,新月筒柱藻(*Cylindrotheca closterium*)、斜纹藻(*Pleurosigma* sp.)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、伏氏海线藻(*T. frauenfeldii*)为优势物种(Mani, 1992);(5)一些赤潮藻也出现在红树林区浮游植物中。

1.3 中国红树林区浮游植物多样性研究

中国红树林区浮游植物多样性研究主要集中于近20年。表2总结了近年来对我国不同红树林区浮游植物种类多样性的研究结果。较早的研究报道如陈坚等(1993),研究了我国广西英罗湾红树林区浮游植物,共鉴定到浮游植物97种,其中硅藻93种(占96%),甲藻3种,蓝藻1种,在种类和数量上都以硅藻占绝对优势;优势种有窄隙角毛藻等角毛变种(*Chaetoceros affinis* var. *willei*)、短孢角毛藻(*C. brevis*)、扁面角毛藻(*C. compressus*)、拟旋链角毛藻(*C. pseudocurvisetus*)、距端假管藻(*Pseudosolenia*

表1 国外报道的不同地区红树林水域浮游植物种类组成与丰度(10^3 cells/L)

采样点 Sampling site	经纬度 Location	采样时间 Sampling time	物种数 Species number	物种组成 Species composition	二异 Cell abundance	参考文献 Reference
双异翅蠹 Mida Creek, North coast of Kenya	3°22'729" S, 39°58'200" E	1996–1997	295		0.909–68.515	Mwashote, 2005
双异翅蠹 Mangrove in the arid environment of Oman		2001	25			Al-Hashmi et al, 2013
双异翅蠹 The Gulf of Mexico	18°30'–18°34' N, 94°59'–95°04' W	2002–2003	179	硬壳134种, 硬壳20种, 硬壳10种, 硬壳9种, 硬壳2种, 硬壳1种, 硬壳4种 134 species of Bacillariophyta, 20 species of Pyrrophyta, 10 species of Chlorophyta, 9 species of Cyanophyta, 2 species of Euglenophyta, and 4 species of other flagellates.	0.327–2.226	Aké-Castillo & Vazquez, 2008
双异翅蠹 Pangul Bay, northern Mindanao, Philippines	7°56'–8°04' N, 123°36'–123°46' E	2008–2009	61	硬壳44种, 硬壳15种, 硬壳2种 44 species of Bacillariophyta, 15 species of Pyrrophyta, and 2 species of Cyanophyta.		Canini et al, 2013
双异翅蠹 Mangrove of Kachchh- Gujarat, Eastern India	23°13'–23°27' N, 68°29'–68°36' E	1999–2000	103	硬壳82种, 硬壳16种, 硬壳2种, 硬壳3种 82 species of Bacillariophyta, 16 species of Pyrrophyta, 2 species of Chlorophyta, and 3 species of Cyanophyta.	94.167–244.5	Saravanakumar et al, 2008
双异翅蠹 Pichavaram mangrove, Southeast India	11°27' N, 79°47' E	1985	82	硬壳67种, 硬壳12种, 硬壳3种 67 species of Bacillariophyta, 12 species of Pyrrophyta, and 3 species of Cyanophyta.	0.36–784.32	Kannan & Vasantha, 1992;
双异翅蠹 Pichavaram mangrove, Southeast India	11°27' N, 79°47' E	2000–2001	91	硬壳73种, 硬壳17种, 硬壳1种 73 species of Bacillariophyta, 17 species of Pyrrophyta, and 1 species of Chrysophyta.		Nedumaran & Prabu, 2009
双异翅蠹 Pichavaram mangrove, Southeast India	11°29' N, 79°46' E	2002–2003	94	硬壳73种, 硬壳15种, 硬壳2种, 硬壳3种, 硬壳1种 73 species of Bacillariophyta, 15 species of Pyrrophyta, 2 species of Chlorophyta, 3 species of Cyanophyta and 1 species of Chrysophyta.	0.4–321	Rajkumar et al, 2009

双异螳螂蠹蝥蜈蚣滚噬狂坤侯振厖振柳	8°47'–9°15' N, 78°12'–79°14' E	2008	36	碯虎30褶, 疎虎2褶, 鼠虎1褶, 菱虎3褶 30 species of Bacillariophyta, 2 species of Pyrrophyta, 1 species of Chlorophyta, and 3 species of yanophyta.	3.9 ± 0.8斛 5.7 ± 0.5	Alikunhi & Kathiresan, 2012
Mangroves in Gulf of Mannar Biosphere Reserve, Southeast India						
双异密勾挥滚螳即鄣蠹膏椒苾柒吞结振柳	21°32'–22°40' N, 88°05'–89° E	1990	29	碯虎27褶, 疎虎1褶, 鑿虎1褶 27 species of Bacillariophyta, 1 species of Pyrrophyta, and 1 species of Chrysophyta.	4.515	Biswas et al, 2010
双异密勾挥滚螳即鄣蠹膏椒苾柒吞结振柳	21°32'–22°40' N, 88°05'–89° E	2000	58	碯虎54褶, 疎虎3褶, 菱虎1褶 54 species of Bacillariophyta, 3 species of Pyrrophyta, and 1 species of Cyanophyta.	5.524	Biswas et al, 2010
双异密勾挥滚螳即鄣蠹膏椒苾柒吞结振柳	21°32'–22°40' N, 88°05'–89° E	2007	59	碯虎53褶, 疎虎6褶 53 species of Bacillariophyta, and 6 species of Pyrrophyta.	17.077	Biswas et al, 2010
密勾挥至蠹膏椒苾柒吞结振柳	–	2010	36	碯虎30褶, 鼠虎3褶, 橘虎2褶, 鼠虎1褶 30 species of Bacillariophyta, 3 species of Chlorophyta, 2 species of Euglenophyta, and 1 species of Xanthophyta.		Aziz et al, 2012
双异密勾挥滚螳即鄣蠹膏椒苾柒吞结振柳	21°40'40.6"– 21°40'44.4" N, 88°08'49.5"– 88°09'19.2" E	2013	56	碯虎46褶, 疎虎7褶, 鼠虎3褶 46 species of Bacillariophyta, 7 species of Pyrrophyta, and 3 species of Chlorophyta.	15–651.5	Choudhury et al, 2015
双异密鄣蠹蜈蚣伐勃结振柳	10°46' N, 79°51' E	2012	71	碯虎53褶, 疎虎11褶, 鼠虎1褶, 菱虎6褶 53 species of Bacillariophyta, 11 species of Pyrrophyta, 1 species of Chlorophyta, and 6 species of Cyanophyta.	22.45–64.52	Arumugam et al, 2016
跌藏Can Gio结振柳噬狂坤侯振厖	10°22'–10°40' N, 106°46'–107°00' E	2009–2010	126	碯虎99褶, 疎虎19褶, 菱虎7褶, 襴虎1褶 99 species of Bacillariophyta, 19 species of Pyrrophyta, 7 species of Cyanophyta, and 1 species of Ochrophyta.	12.207–48.824	Pham, 2017
The Can Gio Mangrove Biosphere Reserve, Vietnam						
膝噪吞埂众挥姪秦嗜结振柳	24°50' N, 66°56' E	2013–2014	29	碯虎26褶, 疎虎3褶 26 species of Bacillariophyta, and 3 species of Pyrrophyta.	42–7,044	Shoaib et al, 2017
A mangrove ecosystem at Sandspit, Karachi, Pakistan						

表2 中国不同地区红树林水域浮游植物种类组成与丰度(10^3 cells/L)Table 2 Phytoplankton composition and abundance (10^3 cells/L) in different mangrove waters in China

采样地点 Sampling site	经纬度 Latitude and longitude	采样时间 Sampling time	总种类数 Total taxa number	种类组成 Species composition	平均细胞丰度 Mean cell abundance	参考文献 Reference
深圳福田 Futian, Shenzhen	22°32' N, 113°45'– 114°03' E	1994	111	硅藻82种, 绿藻4种, 蓝藻4种, 裸藻17种, 隐藻2种, 金藻2种 82 species of Bacillariophyta, 4 species of Chlorophyta, 4 species of Cyanophyta, 17 species of Euglenophyta, 2 species of Cryptophyta, and 2 species of Chrysophyta.	224–2,387.6 (962.56)	Liu & Chen, 1997
深圳福田 Futian, Shenzhen	22°32' N, 113°45'– 114°03' E	2001–2003	75	硅藻68种, 甲藻1种, 绿藻3种, 蓝藻1种, 裸藻3种 68 species of Bacillariophyta, 1 species of Pyrrophyta, 2 species of Chlorophyta, 1 species of Cyanophyta, and 3 species of Euglenophyta.	1,027.4–4,975.1 (2,665.49)	Chen et al, 2005a
深圳福田 Futian, Shenzhen	22°32' N, 113°45'– 114°03' E	2005–2006	51	硅藻34种, 绿藻5种, 蓝藻7种, 裸藻3种, 隐藻2种 34 species of Bacillariophyta, 5 species of Chlorophyta, 7 species of Cyanophyta, 3 species of Euglenophyta, and 2 species of Cryptophyta.	1,210–8,750 (4,260)	Wang et al, 2007, 2009
广西英罗湾 Yingluo Bay, Guangxi Province	21°28' N, 109°43' E	1992	97	硅藻93种, 甲藻3种, 蓝藻1种 93 species of Bacillariophyta, 3 species of Pyrrophyta, and 1 species of Cyanophyta.	0.055–5.15 (1.76)	Chen et al, 1993
福建云霄漳江口 Zhangjiang River Estuary, Yunxiao, Fujian Province	23°53'– 23°56' N, 117°24'– 117°30' E	2001–2003	87	硅藻75种, 甲藻2种, 绿藻4种, 蓝藻3种, 裸藻2种, 金藻1种 75 species of Bacillariophyta, 2 species of Pyrrophyta, 4 species of Chlorophyta, 3 species of Cyanophyta, 2 species of Euglenophyta, and 1 species of Chrysophyta.	351	Chen et al, 2007
福建福鼎后屿湾 Houyu Bay, Fuding, Fujian Province	26°55'– 27°26' N, 119°55'– 120°43' E	2001–2003	77	硅藻74种, 甲藻1种, 绿藻1种, 裸藻1种 74 species of Bacillariophyta, 1 species of Pyrrophyta, 1 species of Chlorophyta, and 1 species of Euglenophyta.	320	Chen et al, 2005b
福建九龙江口 Jiulong River Estuary, Fujian Province	24°29' N, 117°23' E	2001–2003	96	硅藻90种, 绿藻3种, 蓝藻1种, 裸藻1种, 金藻1种 90 species of Bacillariophyta, 3 species of Chlorophyta, 1 species of Cyanophyta, 1 species of Euglenophyta, and 1 species of Chrysophyta.	550	Chen, 2004
广东珠江口 Pearl River Estuary, Guangdong Province	22°43.4'– 22°43.9' N, 113°45.7'– 113°46.3' E	2008–2010	165		1,050–374,430	Huang et al, 2012

calcar-avis)、覆瓦根管藻(*Rhizosolenia imbricata*)、菱形海线藻和伏氏海线藻等。

刘玉和陈桂珠(1997)、陈长平等(2005a)、王雨等(2007)先后对我国深圳福田红树林区的浮游植物多样性进行了调查研究, 分别报道浮游植物111种、75种和51种, 浮游植物的多样性存在不断下降的趋势; 其种类组成特点是受到淡水和污水的影响较大, 浮游植物的种类组成特点是海洋和淡水种类共存, 同时存在一些耐污染种类。陈长平等(2005a)共鉴定到浮游植物5门25属75种, 其中硅藻68种、蓝藻1种、甲藻1种、绿藻3种、裸藻3种。赤潮藻和耐污染特征的种类如威氏海链藻(*Conticribra weissflogii*)和微小环藻(*Cyclotella caspia*)等是浮游植物的主要组成, 底栖性、附着性和淡水性的种类在浮游植物中也经常出现。

对我国红树林区浮游植物多样性虽然已开展了一些工作(陈坚等, 1993; 陈长平等, 2007; 王雨等, 2009; Huang et al, 2012), 但都是区域性的研究, 还缺少针对不同红树林区浮游植物多样性的系统性的比较研究; 另一方面, 浮游植物群落结构的长周期变化研究也比较缺乏, 还需要进一步调查。

1.4 红树林区浮游植物群落结构与环境因子的关系

浮游植物的大量繁殖与水流的波动、潮汐、水柱的分层、营养动态、浮游动物的捕食压力、水温、光照等因素有关, 对环境变化的响应比较快速, 这使得它们成为水生生态系统变化的敏感指示生物(Biswas et al, 2010; Sathicq et al, 2017)。例如, 浮游植物的繁殖与营养盐密切相关, 红树林区和沿海水域的富营养化能促进浮游植物大量繁殖, 甚至发生赤潮(Sathicq et al, 2017), 如骨条藻(*Skeletonema*)和

裸藻(*Euglena*)可以作为红树林区水体富营养化的良好指示生物(林鹏, 1997; 陈长平等, 2007)。在密克罗尼西亚的Chuuk和Kosrae海洋水域, 浮游植物叶绿素a和细菌丰度在靠近红树林的海水中出现了最高值, 离红树林越远其数值也越小, 说明了红树林水体在热带海域的生产力和营养循环中起了重要作用(Choi et al, 2013)。

水体搅动、大陆径流和潮汐都会影响到红树林区浮游植物的群落结构。例如, 浮游植物中有时含有大量的底栖硅藻种类, 这表明底栖硅藻受水体搅动而大量出现在水体浮游植物中; 而一些大洋种或淡水种的出现表明潮汐或径流带来的种类对红树林浮游植物群落结构有较大的影响, 因此, 红树林区浮游植物种类组成变化较大(陈长平, 2004)。

浮游植物的种类组成和细胞丰度有时受到当地生物和非生物因子的强烈影响。例如, 有些地方红树林生境存在较低的浮游植物多样性, 这与红树林根、分解中的腐木和树叶释放出的单宁物质相关(Robertson & Blaber, 1992)。李春强等(2009)研究表明, 某些红树植物中存在抑藻物质, 并能分泌到植物体外(主要通过根分泌), 可抑制赤潮藻类大量繁殖, 对赤潮有一定的防治作用。

1.5 浮游植物对红树林区水体污染的响应与指示作用

刘玉等(1995)研究了深圳福田红树林区生活污水对藻类种群结构的影响, 结果表明, 大部分藻类在污水排入后死亡, 只有少数适应性强的种类可以存活。污水指示生物如藻类中的扁圆囊裸藻(*Trachelomonas curta*)、裸藻(*Euglena* spp.)、线性棒条藻(*Rhabdoderma linearis*)、菱形藻(*Nitzschia* spp.)的大量出现显示水质已被严重污染。

王雨等(2007)对深圳福田红树林区浮游植物群落结构及种群数量变化的研究表明, 福田红树林区能产生赤潮和耐受污染的浮游植物种类比例较高, 赤潮藻如中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*), 以及能耐受污染的种类如颤藻(*Oscillatoria*)、裸藻、小环藻(*Cyclotella*)等在浮游植物群落中大量存在。这与陆源污水输入对浮游植物密度时空变化的影响有关: 浮游植物密度与总氮呈显著负相关, 与盐度呈显著正相关。王雨等(2010)利用浮游植物群落多样性指数结合生物量, 对深圳福田红树林区水体营养状态进行了评价, 检测出富营养化指示种15种,

中营养化指示种11种, 贫营养化指示种9种, 说明水体处于中到富营养化状态, 有向富营养化过渡的趋势, 水体遭受严重污染。

Pham (2017)在越南Can Gio红树林生物圈保护区的研究发现, 氮磷富营养化是影响浮游植物群落演替和种类组成的主要因素。

由此可见, 浮游植物的变化可以作为红树林区水质污染和富营养化的良好指标(Choudhury et al, 2015; Pham, 2017)。

2 红树林区底栖硅藻

2.1 红树林底栖硅藻的物种多样性

与红树林区水体浮游植物相比, 对红树林区底栖硅藻的研究报道相对较少。20世纪80年代以前国际上关于红树林生境中硅藻的研究很少, 如Reyes-Vasquez (1975)研究了委内瑞拉Margarita岛红树林区土壤中的底栖硅藻和大红树(*Rhizophora mangle*)不定根上的附着硅藻, 共鉴定了45个硅藻种类, 其中有17个种为该地区新记录的种。多数研究在80年代以后, 如Maples (1983)研究了美国Louisiana盐沼红树林区亮叶白骨壤(*Avicennia germinans*)气生根上的附生硅藻, 共记录到硅藻27属109种, 最常见的种类是*Nitzschia brittonii*、碎片菱形藻(*N. frustulum*)、*Navicula diserta*、细弱细齿藻(*Denticula subtilis*)和细小双眉藻(*Amphora tenuissima*)。Wah和Wee (1988)报道了新加坡和马来西亚几个红树林区白骨壤的根、种子、淤泥水、土壤、沙粒、软体动物、岩石、流动的木头和叶片上的硅藻, 记录了25属的72个种, 常见种主要是舟形藻(*Navicula*)、双壁藻(*Diploneis*)、菱形藻。Siqueiros-Beltrones和Sánchez-Castrejan (1999)研究了墨西哥红树林区土壤的底栖硅藻, 共鉴定到230种, 常见种主要属于舟形藻、双眉藻(*Amphora*)、菱形藻、曲壳藻(*Achnanthes*)、双壁藻。多样性和丰富度较高, 这说明红树林较少受到人为的干扰, 处于一种原始的环境。之后, Siqueiros-Beltrones和López-Fuerte (2006)报道了墨西哥红树林区大红树根部上的附着硅藻, 共鉴定到86种, 其中有59种是Bahía Magdalena地区的新记录种。

国内对红树林区底栖硅藻较早的研究报道如杜琦和金德祥(1983)研究了福建九龙江口红树林区红树植物秋茄(*Kandelia obovata*)、桐花树(*Aegiceras*

corniculata)、白骨壤树皮上的附着硅藻,发现以半咸水硅藻为主,较能忍受盐度的变化。范航清等(1993)研究了广西红树林区红树植物树干上的附着物、立地土壤、潮沟土壤、腐叶等生境中的底栖硅藻,鉴定出39个属的159个种和变种,数量较多的种属于卵形藻(*Cocconeis*)、双眉藻和曲壳藻,中心纲的具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)是红树植物茎上的主要附生种类。

Chen等(2005c)报道了福建福鼎后屿湾红树林区底栖硅藻的生物量、种类组成与多样性,共发现103种底栖硅藻。Chen等(2010)比较研究了我国亚热带4个秋茄红树林区底栖附着硅藻的地理与季节分布特征,共鉴定到103种,优势种是簇生菱形藻(*Nitzschia fasciculata*)、钝泥生藻(*Luticola mutica*)和爪哇曲壳藻亚缢变种(*Achnanthes javanica* var. *subcontracta*)。

关于红树林底栖硅藻目前多数研究的是底泥表层或红树植物根部附着的硅藻,而对于柱状沉积物样品中的硅藻关注较少。吴祥恩等(2013)鉴定了福建漳州浮宫红树林区6个表层样和1个柱状样的硅藻,共鉴定出103种,其中从柱状样鉴定出68种,大部分为中心纲的圆筛藻属,硅藻种群以浮游的海水种和咸水、半咸水种为主,说明浮宫红树林处于以海水为主的沉积环境中。

目前关于红树林区底栖生活的微藻研究几乎都是针对底栖硅藻,鲜见同时研究硅藻和其他微藻类群的报道。Essien等(2008)对尼日利亚Qua Iboe河口红树林区浮游微藻(浮游植物)、底栖微藻和沉积物微藻同时进行了采样分析,发现这些生境中存在硅藻、蓝藻、绿藻、金藻、裸藻的种类,硅藻是水体、底泥表层和沉积物中的绝对优势类群,分别占97.3%、91.96%和99.14%。

2.2 红树林底栖硅藻的生态作用

硅藻广泛分布于红树林生态系统中的水体和淤泥中,并大量附着在红树植物上(Reyes-Vasquez, 1975; 杜琦和金德祥, 1983; 陈坚等, 1993; 陈长平, 2004)。无论在底栖或浮游环境,硅藻在红树林区的藻类植物中都处于优势地位(陈坚等, 1993; Roy, 1995; Damroy, 1995; 刘玉和陈桂珠, 1997)。由于潮汐和风浪的作用,底栖硅藻和附着硅藻也经常大量出现在水体浮游植物中(陈长平2004)。另一方面,一些海洋的种类也被带到红树林区并沉降到红树林

沉积物中,例如Sylvestre等(2004)在法国Kaw河口红树林泥滩中发现大量的海洋浮游硅藻种类如中心圆筛藻(*Coscinodiscus centralis*)、柱状小环藻(*C. stylorum*)、菱形海线藻。Zong和Hassan (2004)研究了马来西亚半岛2个红树林区泥滩的底栖硅藻与环境因子的关系,发现泥滩底质类型和潮汐是影响底栖硅藻群落的主要因素。

硅藻是红树林区浮游动物、鱼类、软体动物和甲壳类动物的重要食物(Leh & Sasekumar, 1985; Nichola et al, 1988; Wah & Wee, 1988; Vicente, 1990)。例如, Vicente (1990)对红树林区线虫的研究发现,线虫种群数量与底栖硅藻丰度密切相关。在马来西亚的红树林区相手蟹(*Sesarma* sp.)的食物中, Leh和Sasekumar (1985)也发现有少量的硅藻存在。

红树林底栖硅藻对红树林泥沼营养元素循环起到一定的作用,并且可能通过光合作用显著改变土壤的pH值和氧化还原电势,菱形藻则具有吸收重金属的能力,对土壤重金属具有脱毒功能(Sprent, 1978; Darley, 1982)。

红树植物根上存在着丰富的硅藻群落,而这可能对红树植物的生长有不利的影响,同时可能存在某种程度的寄生关系(Reyes-Vasquez, 1975; 杜琦和金德祥, 1983; Maples, 1983; 陈长平, 2004)

底栖硅藻相对固定地生活在一定区域的沉积物中,红树林生态系统中沉积物的重金属含量、水体盐度和pH值等的变化均会影响底栖硅藻的生长繁殖和生理生化特性,进而影响其种类组成与时空分布等(陈长平, 2004)。反过来,红树林区底栖硅藻可以作为水质污染的良好指示生物(Gomez, 1998, 1999)。Gomez (1998)研究发现,与河流上游区相比,在下游区水体的生化需氧量(BOD)与化学需氧量(COD)增加,淤泥生硅藻群落密度和丰富度减少,且群落中有65%以上的细胞出现胞质变形或者是空的现象。

3 红树林区大型海藻

红树林湿地大型藻类一般生长在潮沟、滩面或低矮的红树根系枝干上,其个体较大,种类多样性不如浮游植物和底栖硅藻。目前,对于红树林区大型藻类的研究相对较薄弱。

国外关于红树林区大型海藻的研究报道很少。Aikanathan和Sasekumar (1994)对马来西亚Selangor

红树林中附着在呼吸根、树干基部和沉积物中的大型藻类群落进行调查,发现了9种主要的大型藻类,其生物量、出现频率和藻类覆盖面积比率存在种类差异。靠近陆地逐渐减少的种类是囊藻(*Colpomenia* sp.)、芋根江蓠(*Gracilaria blodgettii*)和厚江蓠(*G. crassa*),近陆地逐渐增多的种类是网地藻(*Dictyota dichotoma*)、粗壮链藻(*Catenella nipae*)、根枝藻(*Rhizoclonium* sp.)和多管卷枝藻(*Bostrychia radicans*)。藻类种类的优势度和基质有关,红树呼吸根部由鹧鸪菜(美舌藻) (*Caloglossa leprieurii*)占主导,沉积物由网地藻占主导。树干底部的40 cm区域由两种藻类占主导,沉积物之上0–20 cm区域由粗壮链藻占主导,而在20–40 cm区域由根枝藻占主导。这一结果揭示了基质对大型藻类群落的重要性。

早期关于我国红树林区的大型藻类并没有专门的研究报道,但在一些红树林生态系统生物多样性或生态学研究中有涉及。如林鹏和韦信敏(1981)在福建亚热带红树林生态学的研究中提到“林下藻类也不少,如浒苔(*Enteromorpha* sp.)曾被作为食品和饲料。此外还有石莼(*Ulva* sp.)、刚毛藻(*Cladophora* sp.)和附生树皮的颤藻(*Oscillatoria* sp.)和鞘颤藻(*Lyngbya* sp.)等”。

林鹏等(1997)报道,福建红树林区的大型藻类有24属42种,其中蓝藻8属15种,红藻3属7种,绿藻13属20种。优势种中鹧鸪菜和节附链藻(*Catenella impudica*)的生物量(干重)在6月分别为2.2–8.4 g/m²和2.69 g/m²,在12月分别为0.15–0.20 g/m²和2.12 g/m²。

刘维刚等(2001)对福建3个红树林区海藻的地理分布及季节变化的研究表明,优势种主要是红藻和一些绿藻,红树林区的红藻较喜荫蔽潮湿的环境,而绿藻较适合生长在光照条件较好的生境;从季节变化看,红藻四季种数变化幅度不大,而绿藻在不同季节种数有明显变化,春季种数最多,进入夏季后种数逐渐减少,到秋、冬季后种数又开始上升。

Zhang等(2014)对湛江红树林区白骨壤和无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)生境中的大型海藻的种类多样性、丰度和元素组成及其时空变化进行了研究,共发现了15属31种大型海藻,优势种是拟刚毛藻(*Cladophoropsis zollingeri*)和条浒苔(*Enteromorpha clathrata*),丰度以春季最高。

根据林益明和林鹏(2001)、何斌源等(2007)报道,

我国红树林区大型藻类有4门55种,其中蓝藻门17种,红藻门13种,褐藻门2种,绿藻门23种。红树林湿地大型藻类的主要优势属有:红藻门的鹧鸪菜属(*Caloglossa*)、卷枝藻属(*Bostrychia*)和链藻属(*Catenella*),绿藻门的绿球藻属(*Chlorococcum*)、根枝藻属、无隔藻属(*Vaucheria*)和浒苔属。从种类数看,一般绿藻门的种类较多,但从生物量看,大多以红藻为优势种,绿藻次之。

4 藻类对红树林生态系统碳库的贡献

红树植物、盐沼植物和藻类是重要的海洋植物群落,其碳捕获能力极为强大和高效,虽然它们的总量只占陆生植物的0.05%,但它们的碳储量却与陆生植物相当,有超过一半的碳被海洋植物捕获并储存在海洋沉积物中,这部分碳被称为“蓝碳”,可以储存上千年(刘慧和唐启升, 2011)。从全球来看,“蓝碳”每年储存的碳量是120–329 Tg C,相当于海洋碳汇年储量的一半左右,“蓝碳”在海洋碳循环过程中的作用十分重要(Duarte et al, 2005)。

随着对海洋“蓝碳”研究的日益深入,滨海湿地生态系统包括红树林湿地的碳储量、碳汇能力在全球碳平衡中的作用和地位也越来越受到重视(张莉等, 2013),但对红树林生态系统碳源汇特征以及碳汇潜力方面的研究却相对薄弱。一般认为,红树林滨海湿地碳库包括植被生物量碳库及沉积物有机碳库。但目前对红树林湿地碳库的研究主要集中在红树林植被的贡献上,往往忽略了藻类的固碳作用及其对红树林湿地碳库的贡献。而实际上,藻类和红树植物一样可以通过光合作用进行固碳,这些碳可以和红树植物一起埋藏在沉积物中,也可以通过不同途径输送到海洋中,成为蓝碳的贡献者。研究表明,藻类是红树林湿地碳库的重要贡献者,如底栖藻类的初级生产力可以达到64 Tg C/yr, 大约为红树林初级生产力(635 Tg C/yr)的10% (Alongi, 2014);浮游藻类光合固碳和死亡后沉积到土壤中,对土壤碳库也会产生影响。

已有研究表明,藻类在红树林具有很高的多样性和生物量(如陈长平, 2004; Biswas et al, 2010; Canini et al, 2013; Arumugam et al, 2016)。但目前关于红树林区藻类的研究大多关注的是藻类的群落结构及作为食物在湿地食物链中的作用(刘玉和陈桂珠, 1997; 陈长平等, 2002; 陈长平, 2004; 刘玉等,

2006)或湿地环境变化的指示生物(Choudhury et al, 2015),而对于藻类在红树林湿地碳储量和碳汇中的贡献鲜有人关注。

藻类是重要的初级生产者,也是红树林区碳的主要贡献者之一,因此,藻类群落组成的变化与红树林区碳储量和碳汇密切相关。但不同门(种)类和不同生态习性的藻类,其固碳能力和碳动态模式也不一样,因此,研究红树林湿地生态系统藻类多样性和生物量有助于阐明藻类在红树林湿地生态系统碳汇和碳循环中的作用。此外,通过红树林表层和柱状沉积物样品碳储量、碳溯源和藻类种类多样性研究,可以明确不同时期(年际和年代际)、不同地点、不同红树林群落类型的红树林湿地有机碳的变化特征、碳库的生物来源及藻类对碳库的贡献,有助于进一步揭示红树林湿地碳源、碳汇的演变机制,反演全球变化和人类活动对红树林湿地生态系统的影响模式。

5 问题与展望

我们认为红树林区藻类多样性虽然已开展了一些研究工作,但还存在研究的时空尺度范围局限、系统性的比较研究薄弱,藻类类群不够系统,与红树林碳库、蓝碳、全球变化等研究的结合不够等方面的问题。因此,我们认为以下几方面可作为今后研究的重点和方向:

(1)目前关于红树林区藻类多样性研究在时空尺度上都比较有限,时间尺度上大多只关注其季节变化,很少关注其年际或10年际的长周期变化;在空间尺度上,多数研究关注的是某一区域,而很少关注不同纬度区域的比较,因此,加强红树林藻类多样性的长周期变化和大尺度空间变化研究是今后研究的一个重点,尤其是我国不同红树林区藻类多样性的比较研究。

(2)目前对于红树林区藻类一般只单独研究浮游植物、底栖硅藻、附着硅藻或大型藻类,如果能同时对一个红树林区不同生境的所有藻类进行综合研究,将可以更好地反映红树林区藻类多样性的特征。

(3)红树林区藻类受到大陆径流和潮汐的影响比较大,其异质性也较大,淡水种类和海洋种类在种类多样性和生物量的贡献比例及其输入机制等问题,是今后研究的重点方向之一。

(4)蓝碳是红树林生态系统碳库研究的一个重点,但藻类对蓝碳的贡献比例和机制等问题值得进一步研究。

(5)红树林区沉积物中的藻类记录了不同年代的藻类生物量与群落结构信息,加强这方面的研究将有助于探明红树林区藻类的演替及其与环境变化的关系,阐明不同时期藻类对红树林碳库构成的影响与长周期变化特征,反演气候变化与人类活动(如富营养化与污染)对红树林碳库的影响。

参考文献

- Aikanathan S, Sasekumar A (1994) The community structure of macroalgae in a low shore mangrove forest in Selangor, Malaysia. *Hydrobiologia*, 285, 131–137.
- Aké-Castillo JA, Vazquez G (2008) Phytoplankton variation and its relation to nutrients and allochthonous organic matter in a coastal lagoon on the Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78, 705–714.
- Al-Hashmi K, Al-Azri A, Claereboudt MR, Piontkovski S, Amin SMN (2013) Phytoplankton community structure of a mangrove habitat in the arid environment of Oman: The dominance of *Peridinium quinquecorne*. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 8, 595–606.
- Alikunhi NM, Kathiresan K (2012) Phytoplankton productivity in interlinked mangroves, seagrass and coral reefs and its ecotones in Gulf of Mannar Biosphere Reserve South east India. *Marine Biology Research*, 8, 61–73.
- Alongi DM (2014) Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195–219.
- Arumugam S, Sigamani S, Samikannu M, Perumal M (2016) Assemblages of phytoplankton diversity in different zonation of Muthupet mangroves. *Regional Studies in Marine Science*, 3, 234–241.
- Aziz A, Rahman M, Ahmed A (2012) Diversity, distribution and density of estuarine phytoplankton in the Sundarban Mangrove Forests, Bangladesh. *Bangladesh Journal of Botany*, 41, 87–95.
- Bandeira SO (1995) Marine botanical communities in southern Mozambique: Sea grass and seaweed diversity and conservation. *Ambio*, 24, 506–509.
- Biswas H, Dey M, Ganguly D, De TK, Ghosh S, Jana TK (2010) Comparative analysis of phytoplankton composition and abundance over a two-decade period at the land-ocean boundary of a tropical mangrove ecosystem. *Estuaries and Coasts*, 33, 384–394.
- Canini ND, Metillo EB, Azanza RV (2013) Monsoon-influenced phytoplankton community structure in a Philippine mangrove estuary. *Tropical Ecology*, 54, 331–343.
- Chen CP (2004) Ecological Distribution of Diatoms in Some Mangrove Areas along the Coast of Fujian and Guangdong

- Province and Influence of Six Heavy Metals on Extracellular Polymeric Substances Secreted by Benthic Diatoms. PhD dissertation, Xiamen University, Xiamen. (in Chinese with English abstract) [陈长平 (2004) 闽粤沿海几个红树林区硅藻的生态分布和6种重金属对底栖硅藻胞外产物的影响. 博士学位论文, 厦门大学, 厦门.]
- Chen CP, Gao YH, Lin P (2002) Progress in the studies of the diatoms in mangrove environment. *Marine Sciences*, 26(3), 17–19. (in Chinese) [陈长平, 高亚辉, 林鹏 (2002) 红树林区硅藻研究进展. *海洋科学*, 26(3), 17–19.]
- Chen CP, Gao YH, Lin P (2005a) Study on the seasonal changes of phytoplankton community and its ecology in Futian Mangrove Reserve of Shenzhen, China. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 44(Suppl.), 11–15. (in Chinese with English abstract) [陈长平, 高亚辉, 林鹏 (2005a) 深圳福田红树林保护区浮游植物群落的变化及其生态学研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 44(Suppl.), 11–15.]
- Chen CP, Gao YH, Lin P (2005b) Dynamics of phytoplankton community in mangrove waters in Fuding City, Fujian Province, China. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 44, 118–122. (in Chinese with English abstract) [陈长平, 高亚辉, 林鹏 (2005b) 福建省福鼎市后屿湾红树林区水体浮游植物群落动态研究. *厦门大学学报(自然科学版)*, 44, 118–122.]
- Chen CP, Gao YH, Lin P (2005c) Biomass, species composition and diversity of benthic diatoms in mangroves of the Houyu Bay, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 24, 141–150.
- Chen CP, Gao YH, Lin P (2007) Seasonal change of phytoplankton community in waters of mangrove in the estuarine of the Zhangjiang River, Fujian Province, China. *Marine Sciences*, 31(7), 25–31. (in Chinese with English abstract) [陈长平, 高亚辉, 林鹏 (2007) 福建漳江口红树林保护区浮游植物群落的变化研究. *海洋科学*, 31(7), 25–31.]
- Chen CP, Gao YH, Lin P (2010) Geographical and seasonal patterns of epiphytic diatoms on a subtropical mangrove (*Kandelia candel*) in southern China. *Ecological Indicators*, 10, 143–147.
- Chen J, Fan HQ, Chen CY (1993) A preliminary study on numerical distribution and species composition of phytoplankton in mangrove waters of Yingluo Bay in Guangxi. *Journal of the Guangxi Academy of Sciences*, 9(2), 31–36. (in Chinese with English abstract) [陈坚, 范航清, 陈成英 (1993) 广西英罗港红树林区水体浮游植物种类组成和数量分布的初步研究. *广西科学院学报*, 9(2), 31–36.]
- Choi DH, Noh JH, Ahn SM, Lee CM, Kim D, Kim KT, Kwon MS, Park HS (2013) Distribution of phytoplankton and bacteria in the environmental transitional zone of tropical mangrove area. *Ocean & Polar Research*, 35, 415–425.
- Choudhury AK, Das M, Philip P, Bhadury P (2015) An assessment of the implications of seasonal precipitation and anthropogenic influences on a mangrove ecosystem using phytoplankton as proxies. *Estuaries and Coasts*, 38, 854–872.
- Damroy S (1995) Studies on mangrove ecology of Chouldari area, South Andaman. *Journal of the Andaman Science Association*, 11, 29–33.
- Darley WM (1982) *Algal Biology: A Physiological Approach*. Blackwell Scientific Publications, London.
- Du Q, Jin DX (1983) Studies on the epiphytic diatoms in the intertidal zones of the Jiulong River estuary, Fujian, China. *Taiwan Strait*, 2(2), 76–98. (in Chinese with English abstract) [杜琦, 金德祥 (1983) 福建九龙江口潮间带海洋植物上的附着硅藻. *台湾海峡*, 2(2), 76–98.]
- Duarte CM, Middelburg JJ, Caraco N (2005) Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2, 1–8.
- Essien JP, Antai SP, Benson NU (2008) Microalgae biodiversity and biomass status in Qua Iboe Estuary mangrove swamp, Nigeria. *Aquatic Ecology*, 42, 71–81.
- Fan HQ, Cheng ZD, Liu SC, Gao YH (1993) Species of benthic diatoms in Guangxi mangrove habitats. *Journal of the Guangxi Academy of Sciences*, 9(2), 37–42. (in Chinese with English abstract) [范航清, 程兆第, 刘师成, 高亚辉 (1993) 广西红树林生境底栖硅藻的种类. *广西科学院学报*, 9(2), 37–42.]
- Gómez N (1998) Use of epipellic diatoms for evaluation of water quality in the Matanza-Riachuelo (Argentina), a pampean plain river. *Water Research*, 32, 2029–2034.
- Gómez N (1999) Epipellic diatom from Matanza-Riachuelo River (Argentina), a highly polluted basin from the pampean plain: Biotic indices and multivariate analysis. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2, 301–309.
- He BY, Fan HQ, Wang M, Lai TH, Wang WQ (2007) Species diversity in mangrove wetlands of China and its causation analyses. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 4859–4870. (in Chinese with English abstract) [何斌源, 范航清, 王瑁, 赖廷和, 王文卿 (2007) 中国红树林湿地物种多样性及其形成. *生态学报*, 27, 4859–4870.]
- Huang QX, Liu Y, Zheng XW, Chen GQ (2012) Phytoplankton community and the purification effect of mangrove in the mangrove plantation-aquaculture coupling systems in the Pearl River Estuary. *Procedia Environmental Sciences*, 15(40), 12–21.
- Kannan L, Vasantha K (1992) Microphytoplankton of the Pichavaram mangals, southeast coast of India: Species composition and population density. *Hydrobiologia*, 247, 77–86.
- Kathiresan K (2000) A review of studies on Pichavaram mangrove, southeast India. *Hydrobiologia*, 430, 185–205.
- Kathiresan K, Bingham BL (2001) Biology of mangroves and mangrove ecosystems. In: *Advances in Marine Biology*, Vol. 40 (eds Southward AJ, Tyler PA, Young CM, Fuiman LA), pp. 81–251. Academic Press, London & New York.
- Leh CMU, Sasekumar A (1985) The food of sesarmid crabs in Malaysia mangrove forests. *Malayan Nature Journal*, 39,

135–145.

- Li CQ, Liu ZX, Li JH, Liao WB, Sun HY, Zhao PJ, Yu XL, Peng M (2009) Allelopathic effects of mangrove on the growth of *Skeletonema costatum*. Chinese Journal of Tropical Crops, 30, 862–867. (in Chinese with English abstract) [李春强, 刘志昕, 黎娟华, 廖文彬, 孙海彦, 赵平娟, 于晓玲, 彭明 (2009) 红树植物化感作用对中肋骨条藻生长的影响. 热带作物学报, 30, 862–867.]
- Li MS, Lee SY (1997) Mangroves of China: A brief review. Forest Ecology and Management, 96, 241–259.
- Lin P (1984) Mangrove. China Ocean Press, Beijing. (in Chinese) [林鹏 (1984) 红树林. 海洋出版社, 北京.]
- Lin P (1997) Mangrove Ecosystem in China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [林鹏 (1997) 中国红树林生态系. 科学出版社, 北京.]
- Lin P, Chen ZF, Liu WG (1997) Ecological characteristics of macroalgae in mangrove forests in Fujian, China. Acta Botanica Sinica, 39, 176–180. (in Chinese with English abstract) [林鹏, 陈贞奋, 刘维刚 (1997) 福建红树林区大型藻类的生态学研究. 植物学报, 39, 176–180.]
- Lin P, Wei XM (1981) The ecological studies of the subtropical mangroves in Fujian, China. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 5, 177–186. (in Chinese with English abstract) [林鹏, 韦信敏 (1981) 福建亚热带红树林生态学的研究. 植物生态学与地植物学丛刊, 5, 177–186.]
- Lin YM, Lin P (2001) Species, diversities, functions and protections of plants in mangrove ecosystem in China. Transactions of Oceanology and Limnology, (3), 8–16. (in Chinese with English abstract) [林益明, 林鹏 (2001) 中国红树林生态系统的植物种类、多样性、功能及其保护. 海洋湖泊通报, (3), 8–16.]
- Liu H, Tang QS (2011) Review on world study of ocean biological carbon sink. Journal of Fishery Sciences of China, 18, 695–702. (in Chinese with English abstract) [刘慧, 唐启升 (2011) 国际海洋生物碳汇研究进展. 中国水产科学, 18, 695–702.]
- Liu WG, Lin YM, Chen ZF, Lin P (2001) Distribution and seasonal change of algae in Fujian mangrove areas. Acta Oceanologica Sinica, 23(3), 78–86. (in Chinese with English abstract) [刘维刚, 林益明, 陈贞奋, 林鹏 (2001) 福建红树林区海藻的分布及季节变化. 海洋学报, 23(3), 78–86.]
- Liu Y, Chen GZ (1997) Study on community structure and ecology of algae in mangrove areas in Futian, Shenzhen. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 36(1), 101–106. (in Chinese with English abstract) [刘玉, 陈桂珠 (1997) 深圳福田红树林区藻类群落结构和生态学研究. 中山大学学报(自然科学版), 36(1), 101–106.]
- Liu Y, Chen GZ, Huang YS, Tan FY (1995) Study on the population structure and pollution ecology of algae in mangrove area in Futian, Shenzhen. China Environmental Science, 15(3), 171–176. (in Chinese with English abstract) [刘玉, 陈桂珠, 黄玉山, 谭凤仪 (1995) 红树林区污水对藻类种群结构的影响. 中国环境科学, 15(3), 171–176.]
- Liu Y, Lu NN, Zhang JF, Dai XK, Li R (2006) Communities of miniature organisms and their ecological functions in Futian mangrove area, Shenzhen Bay. Journal of Tropical Oceanography, 25(5), 56–62. (in Chinese with English abstract) [刘玉, 路宁宁, 张俊帆, 代晓康, 李睿 (2006) 深圳湾福田红树林区藻类、纤毛虫等生物群落及其与环境的关系. 热带海洋学报, 25(5), 56–62.]
- Mani P (1992) Natural phytoplankton communities in Pichavaram mangroves. Indian Journal of Marine Sciences, 21, 278–280.
- Mani P (1994) Phytoplankton in Pichavaram mangroves, east coast of India. Indian Journal of Marine Sciences, 23, 22–26.
- Maples RS (1983) Community structure of diatoms epiphytic on pneumatophores of the black mangrove, *Avicennia germinans*, in a Louisiana salt marsh. Gulf Research Reports, 7, 255–259.
- Mwashote BM, Ohowa BO, Wawiye PO (2005) Spatial and temporal distribution of dissolved inorganic nutrients and phytoplankton in Mida Creek, Kenya. Wetlands Ecology and Management, 13, 599–614.
- Nedumaran T, Prabu VA (2009) Studies on ecology of phytoplankton from Pichavaram mangroves, south east coast of India. Journal of Phytology, 1, 158–163.
- Nicholas WL, Stewart AC, Marples TG (1988) Field and laboratory studies of *Desmodora cazca* Gerlach, 1956 (Desmodoridae: Nematoda) from mangrove mud-flats. Nematologica, 34, 331–349.
- Pham TL (2017) Environmental gradients regulate the spatio-temporal variability of phytoplankton assemblages in the Can Gio Mangrove Biosphere Reserve, Vietnam. Ocean Science Journal, 52, 537–547.
- Rajkumar M, Perumal P, Prabu VA, Perumal NV, Rajasekar KT (2009) Phytoplankton diversity in Pichavaram mangrove waters from south-east coast of India. Journal of Environmental Biology, 30, 489–498.
- Reyes-Vasquez G (1975) Littoral diatoms of the family Naviculaceae from La Restinga Lagoon, Margarita Island, Venezuela. Boletín del Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente, 14, 199–225.
- Robertson AI, Alongi DM, Boto KG (1992) Concluding remarks: Research and mangrove conservation. In: Tropical Mangrove Ecosystem (eds Robertson AI, Alongi DM), pp. 293–326. American Geophysical Union, Washington, DC.
- Robertson AI, Blaber SJM (1992) Plankton, epibenthos and fish communities. In: Tropical Mangrove Ecosystems (eds Robertson AI, Alongi DM), pp. 173–224. American Geophysical Union, Washington DC.
- Robertson AI, Daniel PA, Dixon E (1991) Mangrove forest structure and productivity in the Fly River estuary, Papua New Guinea. Marine Biology, 111, 147–155.
- Roy SD (1995) Mangrove ecology of Alexandra Island and Manjara area of South Andaman. Journal of the Andaman

- Science Association, 11, 58–61.
- Samanta B, Bhadury P (2014) Analysis of diversity of chromophytic phytoplankton in a mangrove ecosystem using *rbcL* gene sequencing. *Journal of Phycology*, 50, 328–340.
- Saravanakumar A, Rajkumar M, Thivakaran GA, Sesh-Serbiah J (2008) Abundance and seasonal variations of phytoplankton in the creek waters of western mangrove of Kachchh-Gujarat. *Journal of Environmental Biology*, 29, 271–274.
- Sathicq MB, Gómez N, Bauer DE, Donadelli J (2017) Use of phytoplankton assemblages to assess the quality of coastal waters of a transitional ecosystem: Río de la Plata estuary. *Continental Shelf Research*, 150, 10–17.
- Shoaib M, Burhan ZUN, Shafique S, Jabeen H, Siddique PJA (2017) Phytoplankton composition in a mangrove ecosystem at Sandspit, Karachi, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 49, 379–387.
- Siqueiros-Beltrones DA, López-Fuerte FO (2006) Epiphytic diatoms associated with red mangrove (*Rhizophora mangle*) prop roots in Bahía Magdalena, Baja California Sur, Mexico. *Revista De Biología Tropical*, 54, 287–297.
- Siqueiros-Beltrones DA, Sánchez-Castrejón E (1999) Structure of benthic diatom assemblages from a mangrove environment in a Mexican subtropical lagoon. *Biotropica*, 31, 48–70.
- Sprent JI (1978) *The Biology of Nitrogen-Fixing Organisms*. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, London.
- Sylvestre F, Guiralb D, Debenay JP (2004) Modern diatom distribution in mangrove swamps from the Kaw Estuary (French Guiana). *Marine Geology*, 208, 281–293.
- Vicente HJ (1990) Monthly population density fluctuation and vertical distribution of meiofauna community in tropical muddy substrate. In: *The Second Asian Fisheries Forum: Proceedings of The Second Asian Fisheries Forum*, Tokyo, Japan, 17–22 April 1989 (eds Hirano R, Hanyu I). The Asian Fisheries Society, Tokyo.
- Wah TT, Wee YC (1988) Diatoms from mangrove environments of Singapore and Southern Peninsular Malaysia. *Botanica Marina*, 31, 317–327.
- Wang WQ, Wang M (2007) *The Mangroves of China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王文卿, 王瑁 (2007) 中国红树林. 科学出版社, 北京.]
- Wang Y, Lin M, Lu CY, Tam NFY (2009) Phytoplankton diversity in Futian mangrove wetland of Shenzhen: Composition and distribution. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1067–1072. (in Chinese with English abstract) [王雨, 林茂, 卢昌义, 谭凤仪 (2009) 深圳红树林湿地浮游植物多样性的组成与分布. 生态学杂志, 28, 1067–1072.]
- Wang Y, Lu CY, Tam NFY, Tang SM (2010) Phytoplankton diversity and assessment of trophic state in Futian mangroves in Shenzhen. *Marine Environmental Science*, 29, 17–26. (in Chinese with English abstract) [王雨, 卢昌义, 谭凤仪, 唐森铭 (2010) 深圳红树林水体浮游植物多样性与营养状态评价. 海洋环境科学, 29, 17–26.]
- Wang Y, Lu CY, Tam NFY, Xu HL, Tang SM (2007) Seasonal and spatial variation of phytoplankton and relationship with water-quality in Futian mangroves of Shenzhen. *Ecological Science*, 26, 505–512. (in Chinese with English abstract) [王雨, 卢昌义, 谭凤仪, 徐华林, 唐森铭 (2007) 深圳红树林区浮游植物时空变化与水质要素的关系. 生态科学, 26, 505–512.]
- Wu XE, Li C, Gong L (2013) Study on diatom composition of mangrove region at Jiulong River estuary, Fujian Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 41, 2985–2988. (in Chinese with English abstract) [吴祥恩, 李超, 龚凌 (2013) 福建浮宫红树林区的硅藻组成研究. 安徽农业科学, 41, 2985–2988.]
- Zhang L, Guo ZH, Li ZY (2013) Carbon storage and carbon sink of mangrove wetland: Research progress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 1153–1159. (in Chinese with English abstract) [张莉, 郭志华, 李志勇 (2013) 红树林湿地碳储量及碳汇研究进展. 应用生态学报, 24, 1153–1159.]
- Zhang YB, Li Y, Shi F, Sun XL, Lin GH (2014) Seasonal and spatial variation in species diversity, abundance, and element accumulation capacities of macroalgae in mangrove forests of Zhanjiang, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(8), 73–82.
- Zong Y, Hassan KB (2004) Diatom assemblages from two mangrove tidal flats in Peninsular Malaysia. *Diatom Research*, 19, 329–344.

(责任编委: 孙军 责任编辑: 时意专)