

珠江口无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)湿地 中浮游动物构成及富营养化评价*

刘 玉^{1,2}

(1. 中山大学环境科学与工程学院 广州 510275; 2. 广东省环境污染控制与修复技术
重点实验室 广州 510275)

摘要 选择珠江口南沙区两处典型的以大面积人工种植红树植物无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)为主的感潮河涌,进行湿地区域中的浮游动物研究。于 2011 年 5 月和 11 月对开放性河涌湿地 14 涌(A 区)和封闭性河涌湿地 19 涌(B 区)中的浮游动物进行调研,从种类数和丰度、污染指示种和优势种、营养指数 E 和污染指数 A 等方面对浮游动物进行群落结构和功能的分析,并以此对湿地水质和无瓣海桑的净化能力进行评价。结果表明,B 区林内原生动物总丰度可达 10^6 ind/L 数量级,7 种丰度优势种均为纤毛虫类,优势种哑铃中缢虫(*Mesodinium rubrum*),1 种赤潮原生动物种类,单种丰度在春秋两季可达 1.8×10^5 ind/L、 5.1×10^5 ind/L。桡足类、枝角类在春季 B 区林内丰度最高,分别可达 576 ind/L 和 46 ind/L,显示春季可能为其繁殖季节。轮虫相对不耐污染生境。指数 E 和指数 A 均远高于判断阈值。提出了二项浮游动物的富营养判断标准和二条原则。据此判断,B 区湿地存在极重的有机污染现象,主要可能与无瓣海桑林内凋落物量较大或根系分泌物的作用且林内水流不畅有关。

关键词 无瓣海桑;河涌;浮游动物;群落结构;营养判断;珠江口

中图分类号 X513

红树林是具有重要生态意义的海岸生境,亦是一种独特的湿地类型。但由于人口增长、城市发展等因素影响,我国红树林面积在 20 世纪 50 年代至 90 年代初一直呈下降趋势。近年来,人们逐渐意识到红树林湿地的生态价值和重要性,特别是不少学者提出红树林具有的污染净化作用(Yan *et al*, 2008),广泛开展了红树林的恢复和重建工作。无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)由于具有生长迅速、适应性广、定居容易的特点(李云等, 1998),成为先锋树种而被广泛引种扩种,种植面积估计达 3800 hm^2 (李玫等, 2008)。无瓣海桑作为引入种,需从多方面研究其可能带来的生态影响,目前较多的研究(Hai *et al*, 2009; 李玫等, 2008; 曾雯璐等, 2008)集中在其对乡土红树植物的影响,但关于无瓣海桑湿地中的浮游动物和湿地水体

营养状况的研究较少。浮游动物在湿地中具有重要生态功能,其最显著的作用是作为湿地食物网中的二级消费者,对湿地物质循环和能量流动发挥着承上启下的作用;另一方面,由于浮游动物中的不少种类对环境具有较高的敏感性,也可以作为指示生物来判断湿地水体的环境污染和富营养化状况(杨宇峰等, 1999; 刘建康, 2000; 吕宪国, 2005)。

根据国家海洋公报(中国海洋信息网, 2012)¹⁾,我国近岸海域包括珠江口都出现了较严重的富营养化现象。我国学者对珠江口水域也进行过较多的水生生态研究(李开枝等, 2005),但对河口内众多感潮河涌(河道)中的富营养化问题以及红树林湿地内浮游动物的研究却几乎为空白,这一区域不仅与居民生活息息相关,而且由于潮汐作用,也会直接影响到河口水

* 国家自然科学基金项目, 41171416 号; 国家高技术研究发展(863)计划, 2007AA091703 号。刘玉, 博士, 副教授, E-mail: eeslyu@mail.sysu.edu.cn

1) 中国海洋信息网, 2012. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/>, 中国海洋环境状况公报(1997—2011). 北京: 国家海洋局
收稿日期: 2012-05-06, 收修改稿日期: 2012-07-30

域的环境质量。本课题选择广州市珠江口南沙区两处典型的以大面积人工种植无瓣海桑为主的感潮河涌进行湿地区域中的浮游动物研究,旨在了解珠江口河涌及无瓣海桑湿地内浮游动物群落结构特征和生态功能,从浮游动物角度评价河涌及无瓣海桑湿地的水体质量。一方面,本研究可以积累和丰富感潮河涌和红树林湿地中浮游动物研究的基础资料;另一方面,本研究提出的浮游动物富营养化水平判断二项标准和二条原则可以解决本研究领域中多年困而未决的问题,提高浮游动物研究的理论水平。同时,本研究可提出城市发展过程中科学利用和保护红树林和湿地资源的建议,为区域生态环境保护提出基础研究依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 调查区概况及样点布设

南沙区位于广州市珠江口南端,区域内水网密布、河涌纵横,有洪奇沥、横沥、沥沁沙等重要水道,有虎门、蕉门、洪奇门和横门 4 个出海口门,亦有漫长曲折的海岸线,加之长期的人工围垦,形成了类型多样、面积广大的湿地(陈桂珠等, 2006)。选择南沙区水流开放性的 14 涌和水流封闭性的 19 涌南沙湿地公园两块典型的湿地进行研究,两湿地均以人工种植的大面积的红树植物无瓣海桑(*S. apetala*)为主, 19 涌内也有小面积芦苇(*Phragmites communis*)。14 涌人工无瓣海桑林面积约为 16 hm², 19 涌湿地公园面积约为 133 hm²。

共布设 8 个采样点,其中 14 涌(定为 A 区)有 2 个,无瓣海桑林内(A₁)和无瓣海桑林外(A₂); 19 涌(定为 B 区)有 6 个,入水口(B₀)、无瓣海桑林内(B₁)、无瓣海桑水道(B₂)、芦苇(B₃)、光滩(B₄)和出水口(B₅)。其中 A₂ 作为 A₁ 的参照点, B₂ 作为 B₁ 的参照点,而 B₀ 和 B₄ 作为园内各点的参照点,它们两个本身也形成一个对照关系,是园内水质和园外水质的一个对照。受潮汐作用, 14 涌和 19 涌水位年度变化约在 2—6m, 盐度变化约在 0.4—3.68。

1.2 生物样品采集与鉴定

于 2011 年春季(5 月)和秋季(11 月)进行浮游动物采样,用 30μm 滤膜过滤 20L 水样,由于水样的混浊度不一而采用沉淀-虹吸法分别浓缩至 30—60ml,鲁哥氏液固定(章宗涉等, 1991)。分别用 0.1ml 浮游生物计数框进行原生动物(Protozoa)和 1.0ml 浮游动物计数框进行轮虫(Rotifera)、桡足类(Copepoda)之幼体

(Larva)和成体(Adult)、枝角类(Cladocera)的镜检、种类鉴定及计数,四类浮游动物丰度均计数换算为 ind/L,样品处理和种类鉴定参照多本资料进行(韩茂森, 1980; 国家环境保护局, 1986; 沈韞芬等, 1990; 章宗涉等, 1991; 周凤霞等, 2008; 马放等, 2010)。

1.3 化学样品采集与分析

在生物样品采集的同时,进行化学样品的采集,部分样品进行现场测定。主要测定因子为 pH 值、水温、盐度、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、总无机氮(DIN)和无机磷(DIP)等,由于调查区域为咸淡水交汇区,水质分析和评价主要采用淡水分析方法并参考海洋分析方法进行(国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会, 2002; 国家质量技术监督局, 1998)。

1.4 水质富营养化评价

由于多样性指数、均匀度指数等经常会出现与生物指标不相协调的情况(马徐发等, 2005),本课题组在以往研究项目中同样也多次出现这种导致数据更加难以解释的现象,因此,本研究直接采用水体营养指数(*E*)和有机污染评价指数(*A*)来判断调研水体的营养状况和有机污染状况(国家海洋局, 2005; 江兴龙等, 2009),从而对结果进行简单和直观解释。 $E = \text{COD}(\text{mg/L}) \times \text{DIN}(\text{mg/L}) \times \text{DIP}(\text{mg/L}) / 4500 \times 10^6$, $E \geq 1$ 为富营养化, *E* 值越高,富营养化程度水平越高; $A = \text{COD} / \text{COD}_0 + \text{DIN} / \text{DIN}_0 + \text{DIP} / \text{DIP}_0 + \text{DO} / \text{DO}_0$, COD、DIN、DIP、DO 分别为水体中各项的实测浓度, COD₀、DIN₀、DIP₀、DO₀ 分别为上述各项的评价标准,其中定为: COD₀=3.0mg/L、DIN₀=0.10mg/L、DIP₀=0.015mg/L、DO₀=5.0mg/L,如果 $A \geq 4$,则表示海域水质受到严重污染。

2 结果与讨论

2.1 浮游动物丰度组成及富营养化判断

南沙二湿地春、秋季各样点浮游动物总丰度见表 1 和表 2。

原生动物总丰度变化: (1) 春季范围为 2274 ind/L (A₁)—300813 ind/L (B₃), 秋季总丰度变化范围为 33544 ind/L (A₁)—1011002 ind/L (B₁), 结果显示原生动物总丰度秋季高于春季,或许原因之一是秋季是原生动物的繁殖季节,另一可能原因是:与春季桡足类和枝角类的大量出现有关,桡足类和枝角类会消耗一些原生动物(刘建康, 2000)。

表 1 南沙二湿地春季浮游动物总丰度组成(ind/L)
Tab.1 Total abundance (ind/L) of zooplankton in spring in two wetlands in Nansha

浮游动物类群	亚类	样点							
		A ₁	A ₂	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Protozoa		2274	33317	48002	200769	131157	300813	2457	30475
Rotifera		18	236	40	6	4	6	58	70
Copepoda	Larva	6	30	34	354	62	34	36	12
	Adult	58	6	10	222	42	8	4	0
	Total	64	36	44	576	104	42	40	12
Cladocera		2	24	20	46	2	0	6	0
总计		112	33613	48030	201399	131267	300861	2561	30557

表 2 南沙二湿地秋季浮游动物总丰度组成(ind/L)
Tab.2 Total abundance (ind/L) of zooplankton in autumn in two wetlands in Nansha

浮游动物类群	亚类	样点							
		A ₁	A ₂	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
Protozoa		33544	53402	51012	1011002	544002	301002	237400	365406
Rotifera		12	8	218	4	6	2	14	32
Copepoda	Larva	20	8	10	42	116	44	50	58
	Adult	0	0	2	12	14	2	2	4
	Total	20	8	12	54	130	46	52	62
Cladocera		0	0	0	2	0	0	0	0
总计		33576	53424	51242	1011062	544138	301048	237466	365500

轮虫的总丰度变化: 最高丰度出现在春季 A₂ 为 236 ind/L 和秋季 B₀ 为 218 ind/L, 说明轮虫可能较喜有水流生境。桡足类的总丰度变化: (1) 春季显著高于秋季, 显示春季可能是其繁殖季节; (2) 春季, 在 B₁ 为 578 ind/L, 显示林内环境较适合其生长; (3) 秋季, B₁ 中桡足类的总丰度较低, 所以原生动物得以大量繁殖; (4) 总的来看, B 区生境较 A 区更适宜桡足类的生长。

枝角类的总丰度变化: (1) 春季显著高于秋季, 秋季丰度极大降低, 显示春季可能是其繁殖季节; (2) 春季, 在 B₁ 丰度最高为 46 ind/L, 显示 B₁ 林内环境较适合其生长; (3) 总体来看, 枝角类的总丰度较低。

浮游动物丰度也是水生态系统功能和水质评价的重要参数之一。借鉴浮游藻类的赤潮判断标准(郭金富等, 1994), 本研究根据浮游动物的体积大小(个体长度)和出现丰度频度(刘建康, 2000; 杨宇峰等, 1999), 提出浮游动物四大类的各类的总丰度的营养程度指示判断标准(表 3), 可对原生动物、轮虫、桡足类和枝角类进行水质指标的营养判断。由于浮游动物的体积大小相差很大, 一般情况下, 范围可为 30—3000 μm , 相差百倍之多, 因此, 根据体积大小而提出不同的判断标准应为较客观、合理和准确。此外, 由于不同的水体中浮游动物出现的类别相差很大, 有时以原生动物为主, 有时以轮虫类为主, 极少时以

表 3 浮游动物富营养化的丰度评价标准(ind/L)
Tab.3 The evaluation standard of eutrophication by zooplankton abundance (ind/L)

个体长度(μm)	min	scope	max	<10	10—29	30—99	100—299	300—1000	1000—3000
丰度(ind/L)				>10 ⁷	>3 \times 10 ⁶	>3 \times 10 ⁵	>3 \times 10 ⁴	>3 \times 10 ³	>3 \times 10 ²
Protozoa	5	30—300	5000			√	√√		
Rotifera	45	200—600	2500				√	√√	
Copepoda	50	Larve: 100—300	500				√	√√	
	300	Adult: 500—5000	5000					√	√√
Cladocera	200	300—3000	18000					√	√√

注: √√富营养化判断(多数情况下); √富营养化判断(严重情况下)

桡足类和枝角类为优势, 为了对不同的水体都可进行评价, 本研究进一步提出浮游动物富营养化的判断原则之一: 浮游动物中只要其中有一类达到富营养化水平, 即可判断其水体为富营养化水平, 也即: 可用浮游动物中的优势一类类群来进行富营养化程度的判断和评价。

从表 3 可知, 一般情况下可以定为: 原生动物在 $>3 \times 10^4$ ind/L 下为富营养化水平, 轮虫和桡足类幼体在 $>3 \times 10^3$ ind/L 下为富营养化水平, 桡足类成体和枝角类 $>3 \times 10^2$ ind/L 下为富营养化水平。由于不同的水体出现的浮游动物优势种可能千差万别, 因此, 本研究也提出浮游动物富营养化的判断原则之二: 要根据研究水体的具体情况来判断水体是否达富营养化水平。举例来说: 假若一个水体是以原生动物为主, 而其中原生动物主要以 $<10\mu\text{m}$ 个体为主, 则其丰度须 $>10^7$ ind/L 方可判断该水体为达到富营养化水平。

此外, 根据原生动物的生态习性及相关大量有关原生动物的研究结果和各类营养类型划分标准(沈德中, 2003), 本研究进一步提出原生动物更详细的营养程度判断标准(表 4)。

从表 4 可知: 对原生动物进行更详细的划分, 富营养化程度被分为 7 级, 分别对应于相应的中国水质级别 I—V 类和劣 V 类(VI、VII 类)。本评价级别划分与以前所用级别划分有极大不同, 主要是由于现今水域污染程度加重, 以前的分级标准较为粗泛且明显已不适用, 如果用以前标准来判断现今水体, 则不仅是湖泊, 几乎所有河流全为富营养型。以前所用级别划分为窦素珍等(2002)提出的标准: 浮游动物四类之和的总丰度: <1000 ind/L 为贫营养型, $1000—3000$ ind/L 为中营养型, >3000 ind/L 为富营养型, 以后这一标准曾被多次引用(王延洋等, 2008), 但这一标准当时也并未提出其数值依据。

根据表 3, 首先对二调查湿地中的浮游动物进行营养程度判断。在本调查水域, 轮虫、桡足类幼体和

成体及枝角类均未达到富营养化水平, 本水域主要是以原生动物产生的富营养化问题为主, 因此, 主要根据原生动物的标准来进行判断(表 4)。

根据原生动物的标准, (1) 在春季: B_1 、 B_2 、 B_3 为 VI 水平, 显示 B 区林内污染高于 A 区; 在秋季: 在 B_1 , 达 VII 水平, 显示林内的严重污染现象。 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 均达 VI 水平, 显著高于 A_1 、 A_2 、 B_0 , 再次显示 B 区林内污染高于 A 区, 可能与 B 区为封闭水道, 水流不畅有关。(2) 在春季: A_1 和 B_4 为 I 级水平, 说明林内原生动物的丰度也可能与光滩相当, 说明在林内水流通畅的情况下, 也不一定会引起原生动物的大量生长。(3) 原生动物最高值达 $1\ 011\ 002$ ind/L, 比春季高出 3 倍。春、秋季原生动物丰度的最小值均出现在 A_1 , 最大值出现在 B_3 和 B_1 。(4) 本次调查的二个湿地主要为原生动物产生的富营养化, 其中以秋季富营养化程度大于春季, B 区高于 A 区。

B_1 富营养化程度在两次调查均较重, 分析认为林内种植的红树植物无瓣海桑产生了大量的凋落物, 加之林内水道和林外水道之间的水体交换缓慢, 使林内水道处于一个相对封闭的环境, 凋落物不易随水流出而在林内不断积累, 其中含有的大量营养元素进入水体为浮游动物生长提供了一个比较适宜的生长环境, 使其出现异常高的峰值。湿地公园 B_1 点的浮游动物丰度在春秋两季均高于 14 涌 A_1 点, 说明水体封闭以后对浮游动物的发展和促进富营养化确有重要作用。

14 涌无瓣海桑林为开放性水道, 受潮汐影响, 水体交换频繁、流动性好, 林内(A_1)、林外(A_2)浮游动物丰度没有明显规律性, 说明只要水体流动性好, 林内和林外都可能生长有很多浮游动物, 与在林内或林外无太大关系。

2.2 原生动物种类组成特征

原生动物种类丰富, 共鉴定出 32 种。在春季有 17 种, 在秋季共有 27 种出现。春秋两季共有种为 13

表 4 原生动物富营养化的丰度评价标准(ind/L)
Tab.4 The evaluation standard of eutrophication by protozoa abundance (ind/L)

水质级别	富营养化级别	TL (Tropical level)	原生动物丰度(ind/L)
I	贫	OT (oligo-trophication)	≤ 5000
II	贫一中	OMT (Oligo-meso-trophication)	$>5000—\leq 1 \times 10^4$
III	中	MT (meso-trophication)	$>1 \times 10^4—\leq 2 \times 10^4$
IV	中一富	MET (meso-eutrophication)	$>2 \times 10^4—\leq 3 \times 10^4$
V	富	ET (eutrophication)	$>3 \times 10^4$
VI	重富	SET (Serious-eutrophication)	$1 \times 10^5—9 \times 10^5$
VII	极富	HET (Hyper-eutrophication)	$>1 \times 10^6$

种,分别为砂表壳虫(*Arcella arenaria*)、弗氏焰毛虫(*Askenasia faurei*)、球形缨球虫(*Cyclotrichium sphaericum*)、圆钵砂壳虫(*Diffugia urceolata*)、哑铃中缢虫(*Mesodinium rubrum*)、球形侠盗虫(*Strobilidium globulosa*)、梨形侠盗虫(*S. pyriformis*)、陀螺侠盗虫(*S. velox*)、绿急游虫(*Strombidium viride*)、梨形拟急游虫(*Strombidinopsis pyriformis*)、梨形四膜虫(*Tetrahymena priformis*)、河生筒壳虫(*Tintinnidium fluviatile*)、中华似铃壳虫(*Tintinnopsis sinensis*)。主要优势种及丰度见表 5。

从表 5 可见, (1) 出现的 7 种丰度优势种均为最典型的有机污染指示种类,其中以纤毛虫类占绝对优势,纤毛虫类一般为喜有机污染的类群,对有机污染的耐受性很强,可在有机污染最重的环境中暴发,如在污水处理厂出现较多,在江河的生猛海鲜食肆鱼船周围水体中成为优势类群(作者多年多项课题监测数据); (2) 哑铃中缢虫(*Mesodinium rubrum*)为优势种,为一种微型自养的原生动物赤潮种类,可在中国的不少海湾形成赤潮,如胶州湾(齐雨藻, 2004; 马放等, 2010)、汕头港海湾(作者 1999 年监测数据); (3) 原生动物优势种均大量出现在 B 区中, A 区丰度较低; (4) 哑铃中缢虫和陀螺侠盗虫在春季和秋季均成为优势种; (5) 19 涌园内的无瓣海桑林内(B₁)污染最重,芦苇(B₃)林内也有较重的污染现象,在 B 区的光滩处(B₄)没有污染指示种类大量出现。这或许可以说明,由于植物的凋落物和根系分泌物进入水体,会促进水体的有机质含量提高和富营养化现象,带来原生动物较高的生长丰度,因此反映了所调查的 B 湿地区域存在较为严重的有机污染或生活污水污染现象。

2.3 两湿地水质因子特征

浮游动物的分布与环境因子密切相关,影响浮游动物生长的主要环境因子有 pH 值、盐度、水温、DO、BOD₅、COD、总无机氮和无机磷等。调查水域水质 pH 值在 7.28—8.31 之间,介于中性偏碱,弱碱性的水体有助于吸收空气中的二氧化碳,为藻类生长提供光合作用所需的二氧化碳,从而有助于藻类的生长,因而也有利于浮游动物的生长。

根据水质测定结果, DO 在 A 区均值为 7.64mg/L, 在 B 区均值为 6.22mg/L。COD 在 A 区均值为 46.55mg/L, 在 B 区均值为 44.06mg/L; DIN 在 A 区均值为 3.1mg/L, 在 B 区均值为 0.88mg/L; DIP 在 A 区均值为 0.15mg/L, 在 B 区均值为 1.54mg/L。由此,计算出 E 值为: A 区为 4810.16, B 区为 13268.91。A 值为: A 区为 58.05, B 区为 127.41。二区均已达极为严重的富营养化程度且 B 区污染重于 A 区。

由于各水质因子的含量均已远超原生动物生长的阈值,因此,原生动物丰度与 COD、DIN、DIP 之间均没有显著的相关性。

2.4 二湿地中原生动物与其它河湖水体中的比较

各类内陆水体中浮游性原生动物的数量在每升为几百个到几万个之间,一般为几千个(刘建康, 2000)。河流中,福建省第四大河晋江的北干渠 2003 年原生动物密度最高值为 3500 ind/L(谢进金等, 2005)。2010 年 7 月和 12 月赣江中下游原生动物密度最高值分别为 32 ind/L 和 17 ind/L(计勇等, 2012)。2010 年 9 月大渡河河口的主河道原生动物密度最高为 358.76 ind/L, 峨嵋河最高为 2314.50 ind/L(方艳红等, 2012); 2011 年 3 月阜阳城区水体中样点西清河中

表 5 南沙二湿地春季和秋季原生动物优势种及丰度组成(ind/L)
Tab.5 The dominant species and abundance (ind/L) of protozoa in spring and autumn in two wetlands in Nansha

原生动物优势种	季节	样点							
		A ₁	A ₂	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
哑铃中缢虫	春季				180000	88126	24000		
	秋季				510000	40000	20000		
陀螺侠盗虫	春季						34490		
	秋季				135000	140000			
梨形侠盗虫	秋季				195000	140000	100000		120000
球形侠盗虫	春季						204000		
绿急游虫	春季			12000	18000				
梨形拟急游虫	春季					29217			
梨形四膜虫	春季			24000					

原生动物最高密度为 7856 ind/L(范可章等, 2012)。湖区中: 1994 年 8 月山东省东平湖在大桥点位原生动物密度的最高值为 6750 ind/L(窦素珍等, 2002)。内蒙古乌梁素海 2004—2005 年原生动物最低丰度为 6933 ind/L, 平均丰度为 25080 ind/L(武国正等, 2008)。巢湖东湖区 2005 年的 6 月出现原生动物密度最高值为 8900 ind/L(王凤娟等, 2006)。福建省九龙江江东库区 2010 年 3 月—2011 年 2 月原生动物最高丰度为 4926.90 ind/L(干建慧等, 2012)。武汉东湖原生动物的数量由 20 世纪 60 年代的每升不足 5000 个, 至 80 年代的每升 10000 个左右, 90 年代又增加至 10 万个左右, 有时高达 50 万个以上(刘建康, 2000)。与以上数据相比较, 本次调研的珠江口无瓣海桑湿地内生长有大量的原生动物, 其值为目前所见最高值, 也说明了封闭性的无瓣海桑湿地可以促进原生动物的大量繁殖。

2.5 无瓣海桑净化功能

有研究指出, 在实验条件下多种红树植物包括无瓣海桑对污水都具有净化作用(Kanokporn *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2010)。本次调查结果显示: 无瓣海桑林内或林外都可以生长有大量的浮游动物, 无瓣海桑对浮游动物丰度没有明显的降低现象, 尤其是在水流不畅的林内, 浮游动物尤其是原生动物更可以大量繁殖到极富营养水平, 因此, 不能说无瓣海桑对水质有净化作用, 反而是无瓣海桑对浮游动物生长有较大的促进作用。

排除桡足类对原生动物的捕食作用, 从浮游动物总丰度看, 芦苇湿地与无瓣海桑相比(表 1 和表 2), B₃ 点浮游动物丰度总体上要低于 B₁ 点, 分析认为芦苇湿地中浮游动物数量相对较低的原因主要可能是芦苇凋落物量较少, 不能提供给浮游动物较好的营养物和生长条件, 抑或是芦苇根部有特殊的分泌物可以抑制浮游动物的生长, 这有待于进一步的研究。

3 结论

(1) 南沙湿地生态系统浮游动物丰度很高, 尤其原生动物在封闭性河涌无瓣海桑林内大量繁殖总丰度可达 10⁶ ind/L 数量级, 达到极富营养水平。该湿地区域存在较重的有机污染现象, 应引起有关管理部门的注意。

(2) 由于无瓣海桑林具有加重近岸海域富营养化的潜势, 因此, 引种植物时应引起高度重视。

(3) 在进行人工红树林种植和恢复时, 应注意在

规划设计和红树种植阶段保证水文条件的流畅, 如此方可有效防止近岸海域水体的富营养化现象, 更好地发挥红树林湿地的生态效应。

(4) 湿地生态系统中各项因子间相关关系较一般环境中更加复杂, 对指标还须进行深入分析, 方能厘清生物和环境因子间的因果关系。

(5) 本研究在多年思考和在多水体环境研究基础上, 提出了二项浮游动物的富营养判断标准及二条原则, 期待今后在更多研究中进一步考证其可行性、准确性及在各环境下的适用性, 以便对其进行更好地修正、补充和应用。

致谢 李艳萍、张丽平、洪泽珊、黎炜驰参加本项外业工作, 李适宇、陈桂珠、李耀初、廖宝文、李策、黄少峰、黄齐欣、李飞等众位同仁曾参加过本研究的历史工作, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 干建慧, 郭东晖, 2012. 福建省九龙江江东库区浮游动物的生态研究. 厦门大学学报(自然科学版), 51(2): 286—291
- 马 放, 杨基先, 魏 利, 2010. 环境微生物图谱. 北京: 中国环境科学出版社, 1—362
- 马徐发, 熊邦喜, 王卫民等, 2005. 道观河水库浮游动物的群落结构与物种多样性. 华中农业大学学报, 24(1): 63—67
- 王凤娟, 胡子全, 汤 洁等, 2006. 用浮游动物评价巢湖东湖区的水质和营养类型. 生态科学, 25(6): 550—553
- 王延洋, 李晓波, 吴 波等, 2008. 上海滴水湖浮游动物研究初报. 上海师范大学学报(自然科学版), 37(2): 167—172
- 方艳红, 黄道明, 王文君等, 2012. 大渡河河口秋季浮游动物的群落结构特征. 水生态学杂志, 33(3): 37—40
- 计 勇, 张 洁, 孙晓秋等, 2012. 赣江中下游浮游动物时空分布特征及水质综合评价. 河海大学学报(自然科学版), 40(5): 509—513
- 吕宪国, 2005. 湿地生态系统观测方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1—245
- 刘建康, 2000. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1—402
- 齐雨藻, 2004. 中国沿海赤潮. 北京: 科学出版社, 1—348
- 江兴龙, 宋立荣, 2009. 泉州湾赤潮藻类优势种演替影响因子探讨. 海洋与湖沼, 40(6): 761—767
- 李 云, 郑德璋, 陈焕雄等, 1998. 红树植物无瓣海桑引种的初步研究. 林业科学研究, 11(1): 39—44
- 李 玫, 廖宝文, 2008. 无瓣海桑的引种及生态影响. 防护林科技, (3): 100—102
- 李开枝, 尹健强, 黄良民等, 2005. 珠江口浮游动物的群落动态及数量变化. 热带海洋学报, 24(5): 60—68
- 杨宇峰, 黄祥飞, 1999. 浮游动物生态学研究进展. 湖泊科学, 12(1): 81—89
- 沈蕴芬, 章宗涉, 龚循矩等, 1990. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1—748

- 沈德中, 2003. 环境和资源微生物学. 北京: 中国环境科学出版社, 1—531
- 陈桂珠, 彭友贵, 吴乾钊等, 2006. 广州南沙地区湿地生态系统研究. 广州: 中山大学出版社, 1—123
- 武国正, 李畅游, 2008. 内蒙古乌梁素海浮游动物与底栖动物调查. 湖泊科学, 20(4): 538—543
- 范可章, 蔡健, 陈小红等, 2012. 阜阳城区水体浮游动物周年结构特征及其与水质评价. 生态环境学报, 21(10): 1724—1730
- 国家环境保护局, 1986. 环境监测技术规范——生物监测(水环境)部分. 北京: 国家环境保护局, 1—97
- 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会, 2002. 水和废水监测分析方法. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 1—257
- 国家质量技术监督局, 1998. 海洋监测规范(GB17378.4-1998). 北京: 国家质量技术监督局, 1—62
- 国家海洋局, 2005. 赤潮监测技术规程 HY/T069-2005. 北京: 中国标准出版社, 1—58
- 周凤霞, 陈剑虹, 2008. 淡水微生物图谱. 北京: 化学工业出版社, 1—367
- 郭金富, 李茂照, 余勉余, 1994. 广东海岛海域海洋生物和渔业资源. 广州: 广东科技出版社, 1—367
- 章宗涉, 黄祥飞, 1991. 淡水浮游动物研究方法. 北京: 海洋出版社, 1—414
- 韩茂森, 1980. 淡水浮游生物图谱. 北京: 农业出版社, 1—171
- 曾雯璐, 廖宝文, 陈先仁等, 2008. 无瓣海桑与三种乡土红树植物混交的生态效应. 生态科学, 27(1): 31—37
- 谢进金, 许友勤, 陈寅山等, 2005. 晋江流域水质污染与浮游动物四季群落结构的关系. 动物学杂志, 40(5): 8—13
- 窦素珍, 喻亲仁, 李东元等, 2002. 山东省东平湖浮游动物与富营养化防治. 重庆环境科学, 24(2): 58—68
- Hai R, Hong F L, Wei J S *et al*, 2009. *Sonneratia apetala* Buch-Ham in the mangrove ecosystems of China: An invasive species or restoration species? Ecological Engineering, 13(8): 1243—1248
- Kanokporn B, Somkiat P, Pipat P, 2003. The use of a mangrove plantation as a constructed wetland for municipal wastewater treatment. Water Science and Technology, 48(5): 257—266
- Yan W, Chung A, Tam N F Y *et al*, 2008. Constructed mangrove wetland as secondary treatment system for municipal wastewater. Ecological Engineering, 34: 137—146
- Zhang J E, Liu J L, Yang Y O *et al*, 2010. Removal of nutrients and heavy metals from wastewater with mangrove *Sonneratia apetala* Buch-Ham. Ecological Engineering, 36(6): 807—812

STRUCTURE OF ZOOPLANKTON AND EUTROPHICATION EVALUATION IN *SONNERATIA APETALA* WETLANDS IN THE ZHUJIANG (PEARL) RIVER ESTUARY

LIU Yu^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510275; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Guangzhou, 510275)

Abstract Structure of zooplankton was studied in two selected tidal channels planted with mangrove tree *Sonneratia apetala* in Nansha District in the Zhujiang (Pearl) River estuary to analyze the purification function of mangrove wetlands. The species composition and abundance, pollution indicator and dominant species of zooplankton was investigated in the open 14th channel (area A) and enclosed 19th channel (area B) in the two constructed wetlands in spring (May) and autumn (November) of 2011, and the eutrophication index *E* and pollution index *A* were calculated, so that water quality and purification capacity of *S. apetala* were evaluated. Results showed that abundances of protozoa could reach to level $\times 10^6$ ind/L; seven dominant species were all ciliates; the dominant species of protozoa was *Mesodinium rubrum*, a red tide protozoan with highest abundance in B₁ 1.8×10^5 ind/L in spring and 5.1×10^5 ind/L in autumn. Copepoda and Cladocera were maximum in abundance in B₁ 576 ind/L and 46 ind/L in spring, respectively; and it was estimated that spring was the reproduction season. Rotifera was intolerant of the habitat. Index *E* and index *A* were all much higher than the threshold value. Two eutrophication judgment standards and two judgment principles of zooplankton were proposed. Based on these, area B was heavily polluted and this maybe related with the litter amount and the root exudates of *S. apetala* as well as the hydrological conditions.

Key words *Sonneratia apetala*; river channel; zooplankton; community structure; eutrophication judgment; the Zhujiang (Pearl) River estuary