

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 21220051403194

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

南海典型海域微型鞭毛虫的生态学研究  
Ecological Studies on Nanoflagellates of Typical Waters  
in the South China Sea

蓝 文 陆

指导教师姓名: 黄邦钦 教授

专 业 名 称: 环 境 科 学

论文提交日期: 2008 年 9 月

论文答辩时间: 2008 年 9 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

2008 年 09 月 日

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 目 录

缩略词列表 .....	I
中文摘要 .....	II
英文摘要 .....	V
<b>1 海洋浮游鞭毛虫及其摄食生态学研究进展 .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 生物海洋学研究背景 .....	- 1 -
1.2 鞭毛虫概况及其生态分布 .....	- 5 -
1.3 鞭毛虫的摄食生态学 .....	- 16 -
1.4 鞭毛虫在微食物网及生态系统中的作用 .....	- 25 -
1.5 本论文研究的目的和内容 .....	- 31 -
<b>第一篇 微型鞭毛虫的时空分布 .....</b>	<b>- 35 -</b>
<b>2 南海北部及珠江口内微型鞭毛虫的时空分布 .....</b>	<b>- 35 -</b>
Spatial and temporal distribution of nanoflagellates in the northern South China Sea .....	- 37 -
<b>3 台湾海峡南部微型鞭毛虫的时空分布 .....</b>	<b>- 52 -</b>
3.1 引言 .....	- 52 -
3.2 材料与方法 .....	- 53 -
3.3 结果 .....	- 56 -
3.4 讨论 .....	- 73 -
3.5 小结 .....	- 82 -
<b>4 南海冷涡对微型鞭毛虫分布特征的影响 .....</b>	<b>- 84 -</b>

4.1 引言.....	- 84 -
4.2 材料与方法 .....	- 85 -
4.3 结果.....	- 87 -
4.4 讨论.....	- 99 -
4.4 小结.....	- 103 -
<b>第二篇 微型鞭毛虫的摄食生态学研究 .....</b>	<b>- 105 -</b>
<b>5 台湾海峡微型鞭毛虫对微微型浮游生物的摄食 .....</b>	<b>- 105 -</b>
Picoplankton production and grazing loss by nanoflagellates in the southern Taiwan Strait .....	- 108 -
<b>6 上升流过程微型鞭毛虫对微微型浮游植物的摄食与调控.....</b>	<b>- 136 -</b>
6.1 引言.....	- 136 -
6.2 材料与方法 .....	- 138 -
6.3 结果.....	- 140 -
6.4 讨论.....	- 149 -
6.4 小结.....	- 155 -
<b>7 微型鞭毛虫对微微型浮游生物主要类群的摄食 .....</b>	<b>- 157 -</b>
7.1 引言.....	- 157 -
7.2 材料与方法 .....	- 158 -
7.3 结果.....	- 162 -
7.4 讨论.....	- 185 -
7.4 小结.....	- 195 -
<b>第三篇 微型生物食物网及其碳流 .....</b>	<b>- 197 -</b>

<b>8 台湾海峡微食物网及其碳流的初步研究 .....</b>	<b>- 197 -</b>
Preliminary study on microbial food web and carbon flow in the upwelling ecosystem in Taiwan Strait .....	- 200 -
<b>9 南海微食物网及其碳流途径的初步研究 .....</b>	<b>- 233 -</b>
9.1 引言.....	- 233 -
9.2 材料与方法 .....	- 233 -
9.3 结果.....	- 238 -
9.4 讨论.....	- 250 -
9.5 小结.....	- 256 -
<b>10 比较与总结 .....</b>	<b>- 258 -</b>
10.1 主要的比较与结论 .....	- 258 -
10.2 本研究的特色与创新 .....	- 267 -
10.3 本研究的不足之处 .....	- 267 -
10.4 今后的工作内容和展望 .....	- 268 -
<b>参考文献.....</b>	<b>- 270 -</b>
<b>附录：主要论文和参与课题 .....</b>	<b>- 295 -</b>
<b>致谢.....</b>	<b>- 297 -</b>

## Contents

<b>Table of abbreviation</b> .....	I
<b>Chinese abstract</b> .....	III
<b>English abstract</b> .....	V
<b>1 Ecological study of marine heterotrophic flagellates</b> .....	1 -
1.1 Brief review of biological oceanography study .....	1 -
1.2 Nanoflagellates and its ecological distribution .....	5 -
1.3 Heterotrophic nanoflagellates grazing .....	16 -
1.4 Roles of heterotrophic nanoflagellates in marine ecosystem .....	25 -
1.5 Objective and contents of the dissertation .....	31 -
<b>Section I Spatial and temporal variations of nanoflagellates</b> ....	35 -
<b>2 Spatial and temporal variations of nanoflagellates in the northern South China Sea</b> .....	35 -
Spatial and temporal distribution of nanoflagellates in the northern South China Sea .....	37 -
<b>3 Spatial and temporal variations of nanoflagellates in the southern Taiwan Strait</b> .....	52 -
3.1 Introduction .....	52 -
3.2 Materials and methods .....	53 -
3.3 Results .....	56 -
3.4 Discussion .....	73 -
3.5 Conclusion .....	82 -

<b>4 Effects of mesoscale cold eddies to nanoflagellates in the South China Sea</b> .....	<b>- 84 -</b>
4.1 Introduction .....	- 84 -
4.2 Materials and methods .....	- 85 -
4.3 Results .....	- 87 -
4.4 Discussion .....	- 99 -
4.4 Conclusion .....	- 103 -
<b>Section II Ecological studies of nanoflagellate grazing</b> .....	<b>- 105 -</b>
<b>5 Grazing loss of picoplankton production by nanoflagellates in the southern Taiwan Strait</b> .....	<b>- 105 -</b>
Picoplankton production and grazing loss by nanoflagellates in the southern Taiwan Strait .....	- 108 -
<b>6 Grazing rates and pressures of nanoflagellates on picoplankton during the upwelling-induced algal bloom</b> .....	<b>- 136 -</b>
6.1 Introduction .....	- 136 -
6.2 Materials and methods .....	- 138 -
6.3 Results .....	- 140 -
6.4 Discussion .....	- 149 -
6.4 Conclusion .....	- 155 -
<b>7 Grazing rates of nanoflagelaltes on picoplankton</b> .....	<b>- 157 -</b>
7.1 Introduction .....	- 157 -



7.2 Materials and methods .....	- 158 -
7.3 Results .....	- 162 -
7.4 Discussion .....	- 185 -
7.4 Conclusion .....	- 195 -
Section III Microbial food web and carbon flow .....	- 197 -
8 Preliminary study on Microbial food web and carbon flow in the southern Taiwan Strait .....	- 197 -
Preliminary study on microbial food web and carbon flow in the upwelling ecosystem in Taiwan Strait .....	- 200 -
9 Preliminary study on microbial food web and carbon flow in the South China Sea .....	- 233 -
9.1 Introduction .....	- 233 -
9.2 Materials and methods .....	- 233 -
9.3 Results .....	- 238 -
9.4 Discussion .....	- 250 -
9.5 Conclusion .....	- 256 -
10 Summary .....	258
10.1 Conclusion of the dissertation .....	- 258 -
10.2 Highlights of the dissertation .....	- 267 -
10.3 Problems and deficiency .....	- 267 -
10.4 Prospect for future work .....	- 268 -

**References** ..... - 270 -

**Appendix: List of the publications and projects attended** ..... - 295 -

**Acknowledgement** ..... - 297 -

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 缩略词对照表

缩略词	英文全称	中文全称
<b>HNF</b>	Heterotrophic nanoflagellates	异养微型鞭毛虫
<b>PNF</b>	Pigmented nanoflagellates	含色素微型鞭毛虫
<b>MNF</b>	Mixtrophic nanoflagellates	混合营养微型鞭毛虫
<b>HDF</b>	Heterotrophic dinoflagellates	异养腰鞭毛虫（异养甲藻）
<b>MFW</b>	Microbial food web	微型生物食物网
<b>Chl <i>a</i></b>	Chlorophyll <i>a</i>	叶绿素 <i>a</i>
<b>DCM</b>	Deep Chlorophyll <i>a</i> maximum	深层叶绿素 <i>a</i> 最大值
<b>SCM</b>	Subsurface Chlorophyll <i>a</i> maximum	次表层叶绿素 <i>a</i> 最大值
<b>FCM</b>	Flow cytometry	流式细胞仪
<b>DOC</b>	Dissolved organic carbon	溶解有机碳
<b>DOM</b>	Dissolved organic material	溶解有机物
<b>POC</b>	Particle organic carbon	颗粒有机碳
<b>FLA</b>	Fluorescent labeled algae	荧光标记藻类
<b>FLB</b>	Fluorescent labeled bacteria	荧光标记细菌
<b>FLC</b>	Fluorescent labeled cyanobacteria	荧光标记蓝细菌
<b>FLP</b>	Fluorescent labeled particle	荧光标记颗粒
<b>DAPI</b>	4',6'-diamidino-2-phenylindole hydrochloride	4,6-联脒-2-苯基吲哚
<b>TCA</b>	Trichloroacetic acid	三氯乙酸
<b>C</b>	Carbon	碳
<b>N</b>	Nitrogen	氮
<b>P</b>	Phosphorus	磷
<b>Si</b>	Silicon	硅
<b>Fe</b>	Ferrum	铁

## 中文摘要

本论文通过荧光显微镜技术研究我国南海典型海区(包括河口、陆架、海盆、上升流等)微型鞭毛虫,包括含色素微型鞭毛虫(PNF)和异养微型鞭毛虫(HNF)丰度的时空变化;并通过多种现场实验手段,研究南海典型海区微型鞭毛虫对微型浮游生物的摄食速率和摄食压力;同时结合其它生物参数,研究南海微食物网(MFW)及其内部的碳流。研究海域包括南海北部(2004年2月和7月)、台湾海峡南部(2004年7-8月、2005年3月、2005年7月和2006年6月)、南海吕宋上升流区(2006年12月和2007年7-8月)以及南海西部上升流区(2006年12月和2007年8月),取得的主要结果如下:

**南海微型鞭毛虫时空分布和变化特征** 南海海区普遍存在PNF和HNF,微型鞭毛虫在各个典型海区中的变化范围较大,微型鞭毛虫的丰度变化范围为 $0.1\sim 15.2 \times 10^3$  cells/mL, PNF丰度变化范围为 $0.03\sim 8.6 \times 10^3$  cells/mL, HNF的变化范围为 $0.07\sim 6.6 \times 10^3$  cells/mL。

珠江河口具有很高的微型鞭毛虫丰度,其丰度多高于 $10^4$  cells/mL。台湾海峡南部上升流区微型鞭毛虫丰度也较高,PNF和HNF较高的丰度在各个航次中主要集中于近岸、近岸上升流区和台湾浅滩外侧上升流区。南海北部近岸海区微型鞭毛虫丰度与台湾海峡非上升流期的丰度很接近,而南海陆架微型鞭毛虫的丰度低于南海北部近岸和台湾海峡南部。深海区的PNF和HNF低于近岸海区,南海海盆非上升流区是南海微型鞭毛虫丰度最低的海区。在吕宋冷涡和南海西部冷涡,较高丰度的PNF和HNF主要集中在冷涡中心及其附近。总体上,南海PNF和HNF显现出一个沿着河口—近岸—陆架—陆坡—海盆的空间梯度逐渐递减的趋势。在垂直分布上,PNF和HNF在不同海区不同站点没有表现出统一的规律,其与叶绿素和异养细菌的垂直分布具有一定的相似。

南海不同海区在冬季与夏季之间PNF和HNF的季节变化具有不同的趋势。台湾海峡南部上升流海区PNF和HNF丰度夏季高于冬季,而且夏季PNF和HNF在最近的这几年(2004~2006)显现出丰度逐渐增加的变化趋势,PNF和HNF随着上升流强度而变化。南海北部近岸海区,微型鞭毛虫在冬夏之间没有明显的季节变化,而在南海北部外陆架海区,冬季微型鞭毛虫丰度略高于夏季,在陆坡海

域, 冬季明显高于夏季。在吕宋上升流区, PNF 和 HNF 的丰度在冬季也明显高于夏季, 但在南海西南部冷涡区, PNF 和 HNF 在冬夏之间的季节变化不明显。

季风、上升流、冲淡水和中尺度涡等物理过程显著影响了 PNF 和 HNF 的上述时空分布变化特征。这些物理过程所导致水体中营养盐、浮游植物叶绿素和异养细菌等重要因子变化则是影响和决定鞭毛虫丰度变化和分布的直接原因, 它们往往相互作用, 共同影响南海鞭毛虫丰度变化和分布。

**HNF 对南海微微型浮游生物的摄食调控** 南海微型鞭毛虫是微微型浮游生物的最主要摄食者, 其对微微型生物表现出很高的摄食压力, 对微微型生物起着重要的调控作用。

台湾海峡微微型浮游植物初级生产力的 40-100% 和异养细菌生产的 16-65% 被微型鞭毛虫摄食所消耗。微型鞭毛虫对微微型浮游植物的摄食速率和压力高于对异养细菌的摄食速率和压力。在表层微型鞭毛虫对微微型浮游植物的摄食压力从近岸到离岸减少, 而对异养细菌则显现出相反的趋势。微型鞭毛虫的摄食速率与微微型生产力和微型鞭毛虫数量有显著的正相关, 微微型生产力越高, 被微型鞭毛虫摄食就越大, 表现出微型鞭毛虫对微微型生物生长的控制作用。

在台湾海峡近岸上升流区域, 微微型浮游植物表现出低生物量高生长率的特点。而微型鞭毛虫对其具有很高的摄食率和摄食压力, 可摄食浮游植物现存量的 115~494% 和初级生产力的 88~197%。微型鞭毛虫的摄食率随着微微型浮游植物生长率的增加而增加, 而且藻华发展期摄食率高于生长率, 能有效控制住微微型浮游植物的增长。但微型鞭毛虫在藻华过程中对  $<20\mu\text{m}$  总浮游植物的摄食压力不高, 并不能有效的控制  $<20\mu\text{m}$  浮游植物的增长。

在生物量和生产力较高的海域,  $5\sim 20\mu\text{m}$  的微型鞭毛虫对微微型生物的摄食起着主要的作用, 在生物量和生产力较低的海域, 微微型浮游植物绝大部分是被  $<5\mu\text{m}$  HNF 摄食消耗。HNF 在外海的清除率比近岸站高, 但总 HNF 对微微型生物的摄食率随着 HNF 和微微型生物的生物量降低而降低。

通过荧光标记颗粒添加的实验得出南海 HNF 摄食率较低, 但其清除率却是同类海区中较高的, 显现一个低摄食率高清除率的特点。 $<5\mu\text{m}$  HNF 个体对微微型浮游生物的摄食率和清除率低于  $5\sim 20\mu\text{m}$  HNF, 但前者类群总摄食率却高于后者。HNF 在南海对微微型浮游植物相对于对异养细菌具有更高的清除率, 表现

出一定的摄食选择性。但在个别站点，HNF 的类群结构导致其对聚球藻具有很高的选择性。细菌丰度和 HNF 类群组成是影响 HNF 个体对细菌的摄食率和清除率，温度在南海不是影响 HNF 摄食率的主要因素，细菌丰度和 HNF 丰度是主要影响 HNF 群体总摄食率的主要因素。

**南海 MFW 结构及其内部的碳流途径** 南海不同生态系统中 MFW 碳生物量的结构不同，其内部各生物类群的生物量随着总生物量的降低而降低，但较大粒级生物所占的比例随着总生物量的降低而显著降低，较小粒级生物的比例却恰好相反。在近岸上升流和河口等初级生产力较高的海域，自养生物量明显高于异养生物量，而在生产力较低的海域，异养生物量接近甚至略高出自养生物量。在近岸上升流区和河口区，浮游植物在生物量和初级生产力主要以微型和小型为主；台湾浅滩和冷涡区以微型和微微型占优势；在外海其它海区主要以微微型为优势。异养细菌和异养鞭毛虫无论是在近岸还是外海均是异养生物量的最主要贡献者，纤毛虫在南部大部分站所占的比重较低（小于 10%）。

台湾海峡南部 MFW 内部在生产力高的海域具有较高的碳流量，而在生产力低的海域碳流量较低。从浮游植物到浮游动物以及从 HNF 到纤毛虫的碳流量从近岸往离岸逐渐降低，而从异养细菌到 HNF 的碳流量却显现一个从近岸到离岸增加的相反趋势。MFW 内的碳流结果显示了食物与捕食者之间的一个平衡关系，同时也显示了从浮游植物到微型和小型浮游动物是南海 MFW 碳流的主要途径以及 MFW 在南海占据着重要的地位。

南海冬季 MFW 内的碳流途径很复杂，各粒级初级生产力和次级生产力被多个营养级的浮游动物所消耗。南海微食物网的营养级在河口倾向于传统的营养级划分，即主要食物链为：微微型生物→HNF→小型浮游动物→桡足类，但在外海倾向于增加一个 $<5\mu\text{m}$ HNF 的营养级，即：微微型生物→ $<5\mu\text{m}$ HNF→ $5-20\mu\text{m}$  微型浮游动物→小型浮游动物→桡足类。较高营养级的浮游动物能够有效缓解较低营养级浮游动物对食物的摄食压力。

**关键词：** 异养鞭毛虫，微微型生物，微型食物网，上升流，中尺度涡旋，南海，台湾海峡

## Abstract

Fluorescent microscope and several field experimental measurements were applied to study temporal and spatial variations of pigment nanoflagellates (PNF) and heterotrophic nanoflagellates (HNF), and nanoflagellate grazing rate and grazing pressures on picoplankton, as well as microbial food web (MFW) structure and carbon flow in typical waters of the South China Sea (SCS). Study waters included the northern SCS (Feb. and July, 2004), the southern Taiwan Strait (TWS; July, 2004, Mar., 2005; July, 2005; June, 2006), upwelling off northwestern Luzon Island (Dec., 2006, July to Aug., 2007), and the upwelling of western SCS (Dec., 2006; Aug., 2007). Main conclusions are as the following:

**Temporal and spatial variations of nanoflagellates** PNF and HNF were ubiquity in the SCS, and their abundance varied in different waters of the SCS. Nanoflagellates ranged from  $0.1 \times 10^3$  cells/mL to  $15.2 \times 10^3$  cells/mL in the SCS. PNF abundance was  $0.03 \sim 8.6 \times 10^3$  cells/mL and HNF abundance was  $0.07 \sim 6.6 \times 10^3$  cells/mL.

Nanoflagellates was very abundant with highest value of the SCS in the Pearl River estuary, and the abundance decreased from upside of estuary to the open sea. Nanoflagellate abundance was secondly highest in the southern TWS, with high abundance of PNF and HNF in coastal upwelling in coastal and upwelling waters. Nanoflagellate abundance in coastal waters in the northern SCS was also high, but there was low in offshore waters. PNF and HNF abundance in offshore waters was very low and the lowest abundance was in the basin of the SCS. Relatively higher abundance of PNF and HNF was observed around the eddy center. Vertical distribution of PNF and HNF in different waters and stations did not show uniform trends, and similar patterns with those of chlorophyll a and bacteria.

Seasonal variations of nanoflagellates between winter and summer showed different patterns in the SCS. PNF and HNF abundance was low in the winter and high in summer, they increased in the summer from 2004 to 2006 in the southern

TWS. However, nanoflagellates did not show significant seasonal variations in coastal water of the northern SCS. In offshore waters of the northern SCS, abundance of nanoflagellate, PNF and HNF, was higher in the winter than that in the summer in northwestern waters off Luzon Island as well as in slope waters in the northern SCS. There was not significant different of PNF and HNF abundance between winter and summer in the western SCS.

Physical factors such as monsoon, upwelling, plume and mesoscale eddy significantly influenced PNF and HNF distribution patterns and variations in the SCS. These physical factors modulated nutrients, chlorophyll a and heterotrophic bacteria and then affected PNF and HNF abundance.

**HNF grazing and control on picoplankton** HNF was a major predator of pico plankton in the SCS. HNF grazing caused 40-100% of picophytoplankton primary production and 16-65% of heterotrophic bacterial production loss in the southern TWS. The grazing pressure of HNF on picophytoplankton decreased from coast to offshore while the pressure on heterotrophic bacteria was on the opposite in the southern TWS. Picoplankton production and HNF abundance was the two main factors which influenced HNF grazing on picoplankton.

Picophytoplankton showed low biomass and high growth rate in the coastal upwelling regions in the southern TWS. HNF showed a high grazing pressure on picophytoplankton in coastal waters of southern TWS, which consumed 115~494% of picophytoplankton standing stock and 88~197% of production per day. HNF grazing rates was exceeded picophytoplankton growth rates and control picophytoplankton increasing during the algal bloom in coastal upwelling. However, HNF showed low grazing rate on <math><20\mu\text{m}</math> phytoplankton and could not control its blooming.

In waters with high biomass, 5~20 $\mu\text{m}$  HNF played major role on grazing picoplankton, while <math><5\mu\text{m}</math> HNF consumed primary part of picoplankton in offshore waters in the SCS. Clearance rates of HNF were higher in offshore waters than that in coastal waters, but the total community consumption rate increased as HNF and picoplankton biomass increasing.

Results showed that HNF was low grazing rate with high clearance rate in the



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库