

生态科学进展

(第五卷)

*Advances in Ecological
Sciences* (Vol. 5)

■ 段昌群 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

生态科学进展

Shengtai Kexue Jinzhan

(第五卷)

Advances in Ecological Sciences
(Vol. 5)



高等教育出版社 · 北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书从生态学基础理论和应用两个方面,遴选了在水域生态学、生理生态学、进化生态学、路域生态学等领域前沿热点问题的专论文章,旨在介绍国内外生态科学的最新成果、发展动态和研究进展,为从事生态学工作的研究人员、高校教师、研究生和高年级本科生了解生态科学发展动态提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

生态科学进展. 第5卷 / 段昌群主编. —北京: 高等教育出版社, 2010. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 028615 - 1

I. ①生… II. ①段… III. ①生态学 - 文集
IV. ①Q14 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 098632 号

策划编辑 高新景 责任编辑 高新景 封面设计 王凌波 责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京民族印务有限责任公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 11
字 数 270 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 6 月第 1 版
印 次 2010 年 6 月第 1 次印刷
定 价 25.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28615 - 00

《生态科学进展》编委会名单

顾 问：吴征镒 张新时 孙儒泳 李文华 蒋有绪 洪德元
 冯宗炜 郑光美 张亚平 方精云 徐汝梅 宋永昌
 钟章成 祝廷成 姜汉侨 金相灿 王焕校 王如松
 骆世明

主 编：段昌群

副 主 编：（按姓氏笔画为序）

 马克平 何大明 张福锁 陈家宽 林金安 祖元刚
 陶 澍 康 乐 盛连喜 傅伯杰 彭少麟 葛剑平

编 委：（按姓氏笔画为序）

 卜文俊 王仁卿 王凤友 王 刚 王根轩 王德利
 叶万辉 叶 辉 龙春林 安树青 严重玲 张一平
 张大勇 张金屯 张金池 李 博 李庆军 李金剛
 束文圣 杨允菲 杨宇明 杨君兴 杨肖娥 杨 良
 杨 劼 杨树华 苏智先 陈小勇 陈同斌 陈保善
 陈桂珠 周 伟 周启星 周浙昆 周 跃 周道玮
 朱永官 岳 明 胡海清 赵之伟 钟 扬 唐 亚
 徐丽华 张国盛 徐宏发 高玉葆 常 杰 康慕谊
 曹 敏 彭 华 葛 颂 董元华 董 鸣 蒋志刚
 韩兴国 虞 泓 雷富民 熊治廷 薛建辉

编 辑 部：高新景（高等教育出版社）

 于福科 刘嫦娥 （云南大学）

前 言

作为探讨生物与环境相互关系的一门学科,生态学已有百年的历史。蓬勃发展的生命科学在向宏观和微观两极延伸的过程中,生态学不仅成为宏观生命科学领域最主要的学科,还因在微观分子、细胞等水平层次上交叉渗透,贯通融合了生物学多个分支学科,成为生命科学领域最活跃、最重要的学科之一。生态学不仅在探索生物生存、适应和进化规律中不断取得突破,而且拓展到对人类生存发展及其资源和环境,乃至地球命运的关心。目前还很少有像生态学那样一个学科,沟通自然界、人类社会和经济运行,在多维视野和多个空间尺度上连接过去、现在和未来,既成为认识自然规律的重要学科,也成为指导人类社会行为准则的一个知识体系,被公认为支撑可持续发展的核心学科之一。

鉴于生态学的重要地位和作用,生态学多年以来热度不减。在国际上,生态学一直是众多高等院校和科研机构优先发展的学科之一。“十一五”以来,我国高校进行重点学科遴选时,全国设立了9个生态学国家级重点学科点,生态学成为设点最多的学科之一;中国科学院在构建国家知识创新体系时,重组、强化和新设立的以生态研究为重要内容的科研机构达20余个。

随着生态学作用和地位被全社会广泛接受和认同,多种层次的教学和研究普遍展开。为此,迫切需要创办一个连续出版物,定期反映和归纳总结国内外在生态学领域的前沿动态和热点问题,为我国生态学科学研究、人才培养和学科建设及时提供最新信息,并成为展示我国生态学研究水平和特色的窗口。这一提议,得到广泛响应。高等教育出版社的林金安先生高度关注这个问题,积极推动了这项工作的发展,为本连续出版物搭建了一个很好的出版平台。在老一辈德高望重的生态学大师们的指导下,在诸多学界同仁和专家们的支持和鼓励下,组织成立了编委会。经过一年多的努力,终于使第一卷书稿问世。该书的组织编写和出版,得到了云南大学生态学国家级重点学科建设和云南省生态建设与可持续发展研究基地、省部共建云南生物多样性保护与利用国家重点实验室培育基地、国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2009ZX07102-004)和云南省高校高原山地生态与资源环境重点实验室暨云南大学环境科学与生态修复研究所的支持。

应该指出的是,生态学任何一个领域,任何一个问题,都可能是一个古老的问题,也可能是一个常讲常新的问题;同一个问题,往往因研究者研究的角度和方法的不同,获得的理解和认识有较大差异;同时生态学研究具有很强的区域性,此地的热点和前沿未必就是彼地的热点和前沿,此地认识透彻了未必就能替代彼地的研究,从而可比性往往较差,有时甚至相互的认同程度不高。好在从不同的角度、不同的层次、不同的区域认识不同或相同的问题,本身就是生态学的重要特色,从而在重点介绍国际生态前沿工作的同时,也注重对我国,乃至不同区域生态学研究工作的综述和评介。如果能做到抛砖引玉,促进学术交流,凸显中国生态学的学术高峰和特色,催生中国生态学的学派发展,本出版物的目的也就达到了。

《生态科学进展》是一个连续出版物,每年一卷。随着它的编辑和出版,更热切期望得到更多生态学前辈和同仁们的关怀和指导,诚恳地希望有更多的老一辈专家和青年学子共同建设这个大

家共有论坛,进入编委会,提供高质量的稿件,为我国生态学的科研和人才培养共同构建一个大家经常想得起、平时用得成的资讯平台。

需要说明的是,第五卷原计划紧密围绕国家水体污染控制与治理科技重大专项的组织实施,组织编写“湖泊及流域生态前沿研究与富营养化控制热点问题”专辑,因第十三届世界湖泊大会在中国武汉召开,多篇优秀论文选入大会合作的学术刊物中发表,从而未能如愿,但本卷仍然是以水生态与水环境为重要内容的。希望随着国家重大水专项研究工作的深入,组织编写水生态或流域生态专辑的条件将更加成熟。我们期待相关科研人员积极参与和支持。

段昌群

2009 年 12 月

目 录

水域生态学与水环境问题防控

河口盐沼湿地生态系统及其食物网研究进展	童春富 (3)
富营养化湖泊的生物地化循环研究进展	何 锋 段昌群 付登高 熊华斌 (19)
碳、氮稳定同位素技术及其在水域生态学研究中的应用	徐 军 周 琼 曾庆飞 张 敏 张 亮 温周瑞 王玉玉 (35)
应用植物材料抑制水华爆发的研究进展	马 妍 柴民伟 石福臣 (81)

生理生态学

植物次生代谢生态学研究进展	阎秀峰 王 洋 陈亚州 李一蒙 庞秋颖 (91)
---------------------	--------------------------

进化生态学

进化生态毒理学研究进展	阎 凯 李 博 韩金保 付登高 段昌群 (125)
-------------------	---------------------------

路域生态学

路域生态学知识体系的构建与学科发展动态	段昌群 毛文碧 李海峰 王 云 陈 兵 甄晓云 (141)
------------------------------	-------------------------------

Contents

Ecology and Environments in Water

- Advances in Research on the Estuarine Salt Marsh Ecosystem and its Food Web
..... TONG Chun-fu (3)
- Advances in Biogeochemical Cycles of Nutrients in Eutrophic Lakes
..... HE Feng DUAN Chang-qun FU Deng-gao XIONG Hua-bin (19)
- Stable Carbon and Nitrogen Isotopes in Aquatic Ecology: Theory and Applications
..... XU Jun ZHOU Qiong ZENG Qing-fei ZHANG Min
ZHANG Liang. WEN Zhou-rui WANG Yu-yu (35)
- Advances in Studies of Controlling the Plankton Blooms Using Plant Materials
..... MA Yan CHAI Min-wei SHI Fu-chen (81)

Physiological Ecology

- Advances in Ecology of Plant Secondary Metabolism
..... YAN Xiu-feng WANG Yang CHEN Ya-zhou LI Yi-meng PANG Qiu-ying (91)

Evolutionary Ecology

- Advances in Evolutionary Ecotoxicology
..... YAN Kai LI Bo HAN Jin-bao FU Deng-gao DUAN Chang-qun (125)

Road Ecology

- Construction of Knowledge System and Progress in Road Ecology
..... DUAN Chang-qun MAO Wen-bi LI Hai-feng
WANG Yun CHEN Bing ZHEN Xiao-yun (141)

水域生态学与水环境问题防控

Ecology and Environments in Water

河口盐沼湿地生态系统及其食物网研究进展

童春富*

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200062)

Advances in Research on the Estuarine Salt Marsh Ecosystem and its Food Web

TONG Chun-fu

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

摘 要 河口盐沼湿地是世界上生产力最高、研究最为广泛的生态系统类型之一。早期河口盐沼湿地生态系统的研究,主要侧重于盐沼植被,强调非生物因子对盐沼植被结构及生产力的决定作用。近年来,研究拓展至各种消费者类群,内容涉及各种生物类群之间的关系、时空结构以及与非生物因子之间的相互作用等方面。其中,以食物网为基础的生态系统功能的研究,成为盐沼湿地生态系统研究的重要内容。食物网分析研究方法已由胃容物分析、食物残骸分析等常规方法,发展为稳定同位素示踪分析、脂肪酸示踪分析等新技术、新方法。其中,以碳、氮稳定同位素分析($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)使用最为广泛,但是需要与胃容物分析等常规分析方法结合使用,以提高分析的有效性,方法本身也有待于进一步的完善。关于盐沼湿地生态系统食物网的研究,近年来主要集中在消费者次级生产的物质来源方面。研究对象主要以鱼类为主,也有部分研究涉及底栖无脊椎动物、浮游动物等消费者类群。与 Teal、Odum 等最初的认识不同的是,相当一部分研究发现,盐沼湿地生态系统消费者次级生产的物质来源主要是各种藻类,高等维管束植物的贡献相对较小;但是不同的研究往往得出不同的结果,并没有一致的规律。

目前,关于盐沼湿地生态系统整体食物网的完整研究还基本未见报道,大量研究工作仅涉及藻类、盐沼植物、鱼类、底栖动物等水域和底栖生境中的生物类群,对空气生境中的消费者类群,如水鸟的相关食物网研究则很少。我国有广泛的盐沼湿地分布,近年来以长江口、黄河口、江苏沿岸等区域为主,对盐沼湿地也开展了大量的研究,但是主要工作仍局限在生物类群及生物与生物、生物与环境之间的相互关系上,从食物网及生态系统整体角度开展的研究还非常少。河口盐沼湿地生态系统及食物网研究还有很长的路要走。

关键词 河口湿地;盐沼;生态系统;食物网

基金项目 河口海岸学国家重点实验室科研业务课题(2008KYQN07);国家自然科学基金(40506029,50939003)。

* 通讯作者 cftong@sklec.ecnu.edu.cn

Abstract As one of the most productive ecosystem types in the world, estuarine salt marsh wetland has been studied extensively in last decades. During the early stage, the study was focused on the effects caused by abiotic factors on the structure and productivity of vegetation. Recently, the study has been extended to the consumers and the interactions between the different components of the ecosystem, including the relationship between different species, their spatial and temporal variation and their interaction with the biotic factors, and so on. Ecosystem functions based on the food webs had grown to be the core important issues for the study. The technologies employed in the food web analysis have also been developed from the regular stomach content and food detritus analysis to the new technologies, such as the isotope trace and fatty acid trace techniques. The techniques of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ analysis are most widely used now. But these techniques still need to be consummated. Most of the studies on the food web of salt marsh wetland ecosystem have been focused on the matter source of the secondary production. In these studies, only some specific consumer groups have been involved. And the groups of fish are most popular objects for that. Present research results are quite different from the theory raised by Teal and Odum. A great number of studies have proved that the algae is the main source for the secondary production of the ecosystem, and the vascular plant marsh contributes only a little to that. But different studies usually get different results and have not gotten a general principle for such issue.

Up to now, very few studies have covered the whole integrate food web of estuarine salt marsh wetland ecosystem. Most of the research works only include those species resting in the aquatic and the benthic habitats, such as the algae, the vascular plant, the fish and the benthic fauna. And very few studies on such issue have related to the species in the air habitat, such as the waterfowl. There are extensive salt marshes in China. In last decades, many studies on salt marsh wetlands have been carried out in Yangtze Estuary, Yellow River Estuary and the coast of Jiangsu Province. But most of these studies have been focused on the characteristics of the species, the interactions between or within biotic and abiotic components. Very few studies about the food web and the integrate ecosystem have been done. There is still a long way need to go before we get the satisfied results.

Key words Estuarine wetland; Salt marsh; Ecosystem; Food web

河口湿地是河流生态系统和海洋生态系统之间的生态交错带,具有咸淡水交汇、陆海邻接的特点。根据河口湿地基质特征,可以分为淤泥质、沙质、基岩质等类型;根据淹水条件,可以分为潮间带湿地和潮下带湿地;根据主要植被类型,则可以分为盐沼、红树林湿地等类型(Cowardin *et al.*, 1979; Mitsch & Gosselink, 2000)。其中,以盐沼湿地分布最为广泛。在中、高纬度河口海岸区域,包括北极圈内部分区域如加拿大北部、阿拉斯加北部、格陵兰岛、冰岛等区域都有分布,从中纬度到低纬度区(南、北纬 25° 之间),逐渐为红树林所取代。但是在部分盐度特别高的区域,红树林往往被盐沼取代(Mitsch & Gosselink, 2000)。

由于盐沼湿地的广泛分布,以及河口与河口湿地在现代经济社会发展中的重要地位和作用,河口盐沼湿地的研究与保护日益受到社会各界的重视与关注。特别是作为盐沼湿地生态系统功能研究核心内容之一的食物网研究,更是成为当前研究的热点。

1 河口盐沼湿地的基本特征与研究概况

1.1 基本特征

盐沼是指在咸水水体边缘的淤积沉积物上生长的自然或半自然的盐生草地或低矮灌丛,生长区域具有潮汐的或非潮汐的水位波动(Beefink, 1977; Mitsch & Gosselink, 2000)。河口盐沼湿地即是以盐沼为主要植被类型的河口湿地。根据河口盐沼湿地发育的环境条件,可以分为两类:一类是以海洋作用为主导形成发育的盐沼湿地,主要分布在有沙坝、沙洲、离岛作为屏障的区域,如美国佐治亚-卡罗来纳海岸和部分浅水海湾,如切萨皮克湾、哈德孙湾、芬迪湾等;另一类是以径流作用为主导,以径流输沙为主形成的盐沼湿地,包括各种大型三角洲的盐沼湿地(Mitsch & Gosselink, 2000),如美国的密西西比河口、中国的长江口、黄河口等。

在同一河口湿地区域,盐沼植被的分布往往受水文及相应环境条件的影响。其分布上界在平均高潮线和大潮高潮线之间,下界取决于水深、淹水时间,以及相应的波浪、沉积、侵蚀作用(Chapman, 1960; Mitsch & Gosselink, 2000)。在盐沼湿地低位区,通常有潮沟系统发育。由于受地貌,包括植被状况的影响,在潮沟及非植被区水流较快,而在植被区水流较慢,由此导致盐沼外围沉积物粒径较粗,向陆域沉积物逐渐变细。在部分区域往往会形成裸露的滩地或积水的洼地,如光滩、水洼。

盐沼湿地生态系统是世界上生产力最高的生态系统之一。中纬度地区由于日照时间长、生长季长,其初级生产力通常高于高纬度地区(Turner, 1976);在同一个地区,盐沼的初级生产力往往与潮汐条件,尤其是潮差直接相关;而在局部区域,则往往受土壤氧化还原条件、硫化物、盐度条件等因素的影响,生产力的空间分布并不均匀(Steever *et al.*, 1976; Odum, 1980; Mendelssohn & Morris, 2000; Mitsch & Gosselink, 2000)。

盐沼湿地生态系统消费者类群,根据其主要生活介质,可以分为空气生境、底栖生境和水域生境三大类:空气生境中以各种水鸟为主;底栖生境中主要包括各种底栖动物以及细菌、真菌等微生物;水域生境中则以鱼类和部分甲壳动物为主(Mitsch & Gosselink, 2000)。

1.2 研究概况

河口盐沼湿地是研究最早、最为广泛的河口湿地生态系统类型,其中就包括湿地生态系统研究先驱 Teal 和 Chapman 的研究工作(Chapman, 1938, 1940; Teal, 1958, 1962)。早期河口盐沼湿地生态系统的研究,主要侧重于盐沼植被的研究,强调非生物因子,包括资源型和非资源型的环境因子对盐沼植被结构及生产力的决定作用(Howes *et al.*, 1986; Emery *et al.*, 2001),如淹水条件、土壤氧化还原条件、硫化物、盐度、营养条件等因素的作用(Steever *et al.*, 1976; Odum, 1980; Mendelssohn & Morris, 2000)。近年来的研究表明,植物的种间竞争是决定盐沼植被结构及生产力的最重要的生物因子(Haker & Bertness, 1999; Emery *et al.*, 2001),而且植被对盐沼沉积环境与周边水环境等都具有重要影响(Chung *et al.*, 2004; Reboreda & Cacador, 2007; Wang *et al.*, 2007);大型底栖动物、鱼类等动物类群在盐沼湿地生态系统功能中占据重要地位,研究对象也拓展至各种消费者类群(Moseman *et al.*, 2004; Reinsel, 2004; Dean *et al.*, 2005; Lee & Silliman, 2006; Jin *et al.*, 2007);各生物类群之间的关系也成为盐沼湿地研究的重要内容(Vinagre *et al.*, 2008)。特别是随着人为干扰影响的加剧,以及全球变化的大背景下,气候变化、人为干扰和外来种引入等对系统组分及过程的影响(Alberti *et al.*, 2007;

Brusati & Grosholz, 2007; Rogel *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009), 以及盐沼湿地的生态恢复(Larkin *et al.*, 2009)也成为当前盐沼湿地生态系统研究的热点之一。

尽管如此,从生态系统角度对盐沼湿地进行物质输运和能流特征的研究仍可追溯到 20 世纪 60 年代。Teal(1962)最早对盐沼的能流进行了分析。据他估算,盐沼对入射太阳光能利用率可以达到 6.1%,1.4% 的入射太阳光能可以转化为净初级生产。盐沼净初级生产中的 47% 通过微生物的呼吸作用丧失,45% 的生产量被直接冲入河口水域(包括潮下带湿地)。在 Teal 最初的研究中,基本上没有考虑脊椎动物,包括鱼类的作用。在 Teal 等研究的基础上,Odum 在 1968 年提出了输出流(outwelling)假说,认为盐沼是初级生产泵(primary production pumps),大量的碎屑物和营养物输出支持了近岸水域较高的渔业生产(次级生产)(Nixon, 1980; Mitsch & Gosselink, 2000)。但是,当时对于输出流假说的验证,并不是基于碳通量的直接计算,而是将盐沼湿地的输出等同于近岸水域和海洋的输入。

此外,从 20 世纪 60 年代开始,也开展了关于河口盐沼湿地的营养物质输运及循环特征的研究,但是却一直没有发现统一的规律。如在美国的佐治亚、特拉华和马里兰的河口,盐沼湿地被认为是河口磷的源(Reimold, 1972; Gardner, 1975; Stevenson *et al.*, 1977);在纽约长岛的河口,发现盐沼具有较高的有机磷的输入和无机磷的输出,而氮的输入和输出基本平衡(Woodwell *et al.*, 1979);而在佐治亚 Sapelo 岛盐沼由于反硝化作用大于氮的固定,被认为是水体氮的汇;Childers 等(2000)认为盐沼的净通量在河口营养循环中所占比例不大,营养与有机质的通量与潮汐呈正相关(Mitsch & Gosselink, 2000)。从近年的研究结果汇总情况来看,河口盐沼湿地在营养物质输运中的作用,是作为“源”还是“汇”,是以输入为主还是以输出为主,并不是确定的或一成不变的,它往往随着环境条件的改变而发生相应的变化。与之相对应,关于河口盐沼物质输运特征研究结果的陈述或者引用,必须考虑它的研究背景以及研究开展时实际的环境条件,而不能单纯地引用研究结果。

20 世纪 80 年代以后,特别是 90 年代以来,随着河口盐沼湿地食物网研究的深入,相关的研究结果使最初关于盐沼湿地生态系统初级生产产物的输运特征及归宿的认识发生了很大的变化。

2 河口盐沼湿地食物网研究

生态系统中不同物种间最主要的联系是食物联系,通过食物联系而直接或间接地把各个组分连成一个整体,这种联系称为食物链,食物链相互交叉就成为食物网。当前,食物网研究已经成为水生生态系统、湿地生态系统功能研究的核心组成部分((DeJonge, 1990; Baird & Ulanowicz, 1993; Livingston, 2002; Pasquaud *et al.*, 2008),是深入研究生态系统物质循环、能流等重要功能的基础。食物网研究的首要任务是要分析不同物种间的营养关系(Loc'h *et al.*, 2008),由此确定食物网的路径与结构。

2.1 研究方法的发展

河口盐沼湿地生态系统食物网研究的主要分析、研究方法可以分成两大类:一类是常规方法,即在早期食物网研究中采用较多的方法;另一类是在现代科学技术基础上发展起来的新技术、新方法。

2.1.1 常规方法

常规研究方法一般是通过直接观察、胃容物分析、粪便分析、食物残骸分析,以及饲养实验等方

法分析研究动物的食性;在此基础上,确定相应动物类群的营养级以及不同生物类群之间的营养关系,绘制出食物链和食物网(陆健健,2003)。

采用这一类研究方法,可以很好地确定不同物种间的营养关系,分析结果较为客观。而且根据胃容物、摄食量等,可以很好地定量物质和能量在食物网中的运输和传递特征。但是在实际的使用过程中,通常不同的生物类群需要采用不同的分析方法,如鸟类一般采用直接观察或者粪便、食物残骸分析,而鱼类一般采用胃容物分析法,由此可能会造成结果的偏差;而且有些方法分析较为繁杂,对专业技术要求较高。部分分析方法,如胃容物分析,需要杀死动物个体才能取到相应样本,对动物类群有一定的伤害。

2.1.2 现代技术

现代同位素分析研究技术的发展,为食物网研究提供了有效的手段。常用稳定同位素指标(比例)有 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ (Machas *et al.*, 2006; Wilson *et al.*, 2009),但是使用最多的是 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素分析技术(Grall *et al.*, 2006; Serrano *et al.*, 2008; Loc'h *et al.*, 2008)。一般 $\delta^{13}\text{C}$ 用于确定营养关系(食物来源), $\delta^{15}\text{N}$ 用于确定营养等级(Lin *et al.*, 2007; Richoux & Froneman, 2007; Pasquaud *et al.*, 2008)。运用稳定同位素方法分析研究食物网是基于组成生命体的原子来自于食物(营养物质)这一事实。

但是近年来的研究也发现,在自然界的有机物质库中,稳定同位素的比例常因时空条件的差异而发生变化(Stephenson *et al.*, 1984; Cloern *et al.*, 2002; Carlier *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2007),可能会影响对测定结果的分析和判断。所以很多学者建议,稳定同位素分析技术与其他方法,如胃容物分析技术,一起使用会更加有效(Peterson, 1999; Lin *et al.*, 2007; Pasquaud *et al.*, 2007),因为胃容物分析,可以提供较为稳定、准确的关于食物组成、来源的信息,而这是稳定同位素分析很难做到的。目前稳定同位素分析方法本身,还有待于进一步完善。如对于稳定同位素分析中样品的前处理,是否需要酸洗以及酸洗对分析结果的影响等,还有较多的争议(Serrano *et al.*, 2008)。

除了稳定同位素分析方法,随着各种生理、生化技术的发展,各种新方法也应运而生。如分析食物的氨基酸组成,也能确定相应食物对食物网的贡献(Carlier *et al.*, 2007);特定的胞内脂肪酸也能用于示踪研究食物网,分析消费者的食物来源(Hall *et al.*, 2006; Haubert *et al.*, 2008; Henning *et al.*, 2009)。

此外,随着计算机及数学建模技术的发展,建模研究也成为食物网研究的重要方法(Degre *et al.*, 2006; Whipple *et al.*, 2000),但是建模方法的应用需要以营养关系的研究为基础,它更多地应用于系统要素分析基础上的综合研究,以及以系统分析、现状特征为基础的前瞻性(预测)分析。

2.2 理论观点的发展

2.2.1 关于次级生产的物质来源

近年来,关于盐沼湿地生态系统食物网的研究主要集中在消费者次级生产的物质来源方面。但是针对不同盐沼湿地生态系统开展的研究,往往得出不同的结果,并没有一致的规律;而且研究对象主要以鱼类为主,也有部分研究涉及大型底栖无脊椎动物、浮游动物等消费者类群。

与最初 Teal 和 Odum 的观点不同, Kreeger 和 Nowell 研究发现,后生动物的较高的次级生产并不是直接或间接源自各种维管束盐沼植物,而是来自各种小型的底栖藻类;维管束盐沼植物的碎屑物由于具有较高的纤维素含量,除了 10% 左右的初级生产被植食性昆虫取食,一般的后生动物很难吸收消化(Kreeger & Nowell, 2000; Mitsch & Gosselink, 2000)。Hughes 和 Sherr 采用 $\delta^{13}\text{C}$ 分析研

究发现,盐沼湿地中鱼类的物质来源主要是米草和底栖藻类(Hughes & Sherr, 1983); Sullivan 和 Moncreiff 通过测定 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 发现,盐沼湿地中鱼类的主要食物来源是底栖和浮游藻类(Sullivan & Moncreiff, 1990)。Stribling 和 Cornwell 研究发现, C_3 植物在微咸水湿地的鱼类食物中占有重要地位(Stribling & Cornwell, 1997)。而 Kwak 和 Zedler 发现有盐沼植被分布的区域,米草是河口鱼类有机物质的主要来源,而在没有米草的潟湖区域,藻类成为鱼类主要的物质来源(Kwak & Zedler, 1997)。Wairight 等人发现大型湿地植物和底栖藻类是盐沼湿地中鱼类的重要食物来源(Wairight *et al.*, 2000)。而 Sa 等人通过胃容物研究发现,河口及邻近盐沼鱼类的主要食物为端足类、多毛类以及部分虾类和小鰕虎鱼(Sa *et al.*, 2006)。研究结果的不同可能与不同河口鱼类组成、饵料生物的差异有关;而即使同一河口,盐沼湿地鱼类的种类组成也会因季节不同而存在差异(Veiga *et al.*, 2006)。因此,研究区域、采样时间的不同,以及相应区域植被、鱼类等生物类群的组成差异,往往也会得出不同的结果。

除了鱼类,其他消费者类群的研究结果也相类似。Shimoda 等人对和美虾属的三种虾类的食物来源的研究发现,不同种类之间的食物来源存在明显差异,有的取食海草的碎屑,有的取食浮游和底栖藻类;在不同时段,取食的对象也会有所变化;它主要取决于相应生境特征(Shimoda *et al.*, 2007)。Svensson 等人通过对两个温带河口的对比研究发现,底层的哲水蚤在不同的河口、不同的地点会选择性取食不同的碎屑物;盐沼植物对食物网的作用也因不同的河口、不同的地点而有所不同(Svensson *et al.*, 2007)。Choy 等的研究结果有所不同,他们发现盐沼湿地鱼类以及底栖无脊椎动物主要以藻类为食物,高等维管束盐沼植物的贡献非常小;取食物食性较为相似的主要为同一取食功能群的物种,而与生境或者分类单元的关系不大(Choy *et al.*, 2008)。余婕等研究发现,湿地优势植物的活植物体不是大型底栖动物的主要食物来源,沉积有机质是大部分底栖消费者的食物基础(余婕等, 2008)。

综上所述,尽管目前关于盐沼湿地生态系统消费者次级生产的物质来源开展了大量的研究,但是不同的研究(不同的地点、不同的时间、不同的物种等)往往得出不同的结果,并没有统一的规律。在引用相应研究结果时,必须要考虑相应的研究背景以及研究时实际的环境条件,避免断章取义。

目前相关研究中涉及的消费者类群主要以水域、底栖生境中的种类为主,对于空气生境中的种类,如鸟类、昆虫等的相关研究则开展的相对比较少,这可能与生物样本的可获得性有关。

2.2.2 关于食物网的结构与功能

最早的、相对较为完善的食物网结构与功能的研究是在 Teal (1962) 的研究工作基础上开展的关于佐治亚盐沼湿地能流的研究,如图 1 所示。但是,当时的研究并没有意识到其他消费者类群,如鱼类、鸟类等的重要作用,而未将其列入食物网和系统能流分析。如前所述,目前鱼类等生物类群在盐沼食物网中的作用也得到了广泛的研究,相当多的研究探讨了盐沼湿地食物网的控制机制,但是大部分研究仅涉及两个生物类群之间的关系,而且主要以盐沼植物、藻类、鱼类、底栖动物等生物类群间的关系研究为主,对涉及湿地鸟类、兽类等生物类群的完整的食物网研究开展的还非常少(Valiela *et al.*, 2004; Akin & Winemiller, 2008; Guirao *et al.*, 2008)。图 2 为 Mitsch 和 Gosselink (2000) 综合现有研究结果及理论分析绘制的河口盐沼湿地生态系统概念模型图。但是,由于河口环境条件的复杂多变,到目前为止,还没有一项研究可以完整地涵盖该图所描绘的所有系统组分与过程。河口盐沼湿地生态系统食物网结构与功能的研究还有待进一步的完善。

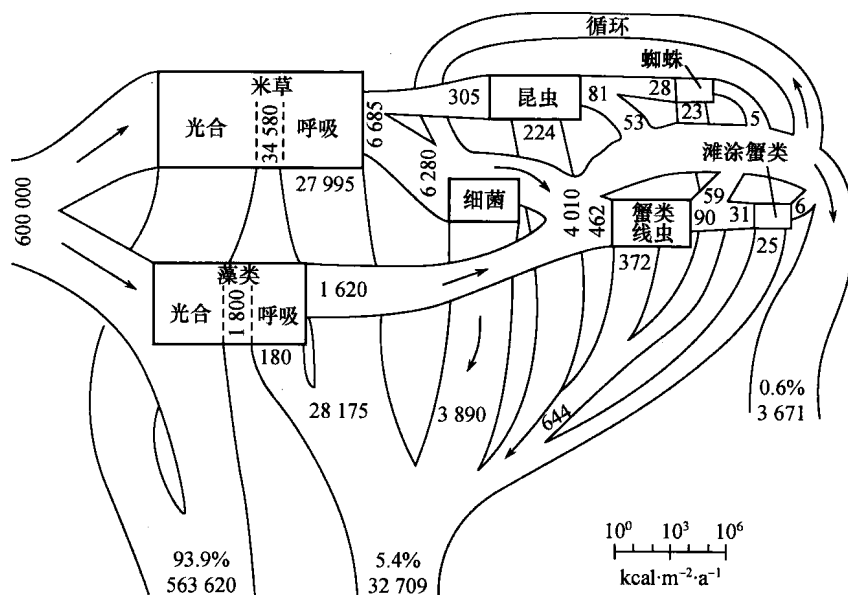


图1 佐治亚盐沼湿地能流图(引自:Mitsch & Gosselink, 2000)

Fig. 1 Energy flow diagram of Georgia salt marsh (From:Mitsch & Gosselink, 2000)

3 我国河口盐沼湿地及其食物网研究

我国河口盐沼湿地分布范围广泛,也开展了大量的研究。主要研究工作集中在长江口、江苏沿岸以及黄河口的盐沼湿地。近年来的研究内容主要涉及盐沼湿地的非生物组分及过程特征、生物组分及其相互作用等。非生物组分及过程特征的研究,涉及沉积物及相应过程(张修峰等,2006;陈庆强等,2007a,2007b,2007c;陈华等,2007;刘华和张利权,2007;李华等,2008;沈永明等,2008)、水与水环境、水文过程等(贺宝根等,2008;王初等,2009;辛沛等,2009)。

生物组分的研究主要侧重于植被、底栖动物、水鸟以及鱼类的研究。我国早期盐沼植被的研究主要集中于环境因子与盐沼植物的关系,以及盐沼植物种群特征的分析。如张利权等研究了海三棱藨草种群特征(张利权和雍学葵,1992a,1992b),包括种群密度和生物量动态、种群分布格局与物候等;孙书存等研究了海三棱藨草沿高程梯度的生物量分配、繁殖对策、潮沟生境以及潮汐的影响等(孙书存等,2001;Sun *et al.*, 2001;Sun *et al.*, 2002)。近年来对盐沼植物的种间关系(Sun *et al.*, 2003;童春富,2004¹),盐沼植物与环境条件的相互作用(李华和杨世伦,2007;全为民等,2007;王爱军等,2006;毛志刚等,2009;贺强等,2009),盐沼植被的时空动态(刘永学等,2004;张忍顺等,2005;张绪良等,2006;黄华梅等,2007;王东辉等,2007),光谱特征(高占国和张利权,2006a, 2006b)以及外来物种互花米草的相关研究(陈瑶等,2005;陈洪全等,2006;王卿等,2006;陈琳等,2007;赵聪蛟等,2008;张亦墨等,2008;商栩等,2009)。我国河口盐沼湿地鸟类的研究开展得相对较早,如从20世纪80年代初开始,钱国桢及其学生就在长江河口湿地开展了多层次的鸕鹚类调查研究(钱国桢,1985,1988),包括鸕鹚的群落结构、多样性及食性等。近年来随着河口滩涂围垦的

¹童春富. 河口湿地生态系统的结构,功能与服务——以长江口为例. 2004. 上海:华东师范大学博士学位论文