

TECHNOLOGY SYSTEM OF ENVIRONMENTAL
ENGINEERING AND ECOLOGICAL OPTIMIZATION
FOR LARGE-SCALE MARINE CULTURE PARK

规模化海水养殖园区 环境工程生态优化技术体系

孙福新 宋娴丽 © 主编



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

规模化海水养殖园区 环境工程生态优化技术体系

孙福新 宋娴丽 主编

中国海洋大学出版社

· 青岛 ·

图书在版编目(CIP)数据

规模化海水养殖园区环境工程生态优化技术体系 /
孙福新, 宋娴丽主编. —青岛: 中国海洋大学出版社,
2017. 7

ISBN 978-7-5670-1524-1

I. ①规… II. ①孙… ②宋… III. ①海水养
殖—养殖场—生态环境—研究—中国 IV. ①S967

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 186447 号

出版发行 中国海洋大学出版社

社 址 青岛市香港东路 23 号

邮政编码 266071

出版人 杨立敏

网 址 <http://www.ouc-press.com>

电子信箱 94260876@qq.com

订购电话 0532-82032573(传真)

责任编辑 孙玉苗

电 话 0532-85901040

印 制 日照报业印刷有限公司

版 次 2017 年 8 月第 1 版

印 次 2017 年 8 月第 1 次印刷

成品尺寸 185 mm×260 mm

印 张 30.5

字 数 685 千

印 数 1—1000

定 价 98.00 元

如发现印装质量问题,请致电 0633-8221365,由印刷厂负责调换。

编辑委员会

主 编:孙福新 宋娴丽
副主编:王志刚 叶海斌 李 琪 潘鲁青 李 斌 梁 勇
编 委:胡凡光 逢劭楠 吴志宏 李天保 胡发文 田传远
张明磊 赵 文 王雪梅 孙同秋 王 波 樊 英
郭萍萍 李焕军 张金路 宋爱环 辛美丽 刘 钢
魏 杰 孔令锋 李 赞 孙玉忠 曾海祥 吴海一
徐智广 盖春蕾 菅玉霞 王 雪 宋向军 段登选
李媛媛 尹琳琳 郑风荣 石洪华

前言

我国是世界上海水养殖产量最高的国家。2014年,我国海水养殖产量达到1 813万吨,占世界海水养殖产量的67%以上(FAO,2016),养殖品种主要涉及鱼类、贝类、对虾、海参等。其中,我国北方沿海地区主要是以渔业养殖园区的形式进行各经济种类的养殖生产,海水养殖业已成为这些区域出口创汇和增加渔民收入的主要来源。

近年来,我国海水养殖园区建设发展迅速。以山东省为例,自2012年该省获批万亩^①面积以上的现代化海水养殖园区17个,总面积达到了30万亩。随着山东省“海上粮仓”战略的实施和海洋生态文明建设的推进,至2020年,山东省将建设现代渔业示范园区100处,其中工厂化养殖水体达到200万立方米,近海和海洋牧场养殖面积达到100万亩,并会将其打造为“海上粮仓”建设的主体区、科技转化核心区、新型渔业经济集成区。随着渔业园区的快速发展和其规模的持续扩大,其生产规模和排放方式势必会对海水养殖生态环境产生深远的影响,各园区在规划建设、安全生产、循环利用、信息化管理等方面也不同程度地出现了一系列发展瓶颈问题,渔业园区建设所需的技术成果亟待集成、优化与创新。

本研究以优化海水养殖环境工程技术为切入点,采用创新规划理念,以工程生态优化、养殖品种多元化、水资源循环利用等手段集成规模化园区海水养殖循环工程优化、生态环境友好、生产安全控制、管理信息监测等技术,选择典型海水养殖园区开展示范,进一步提高我国规模化海水养殖园区循环经济水平,为海水养殖产业生态化建设提供技术支撑。

本研究开发的海水养殖园区环境工程生态优化技术,有助于解决渔业经济发展所带来的一系列环境生态问题;研发的新能源、新装备、新技术、新工艺、新模式、新规范将为我国现代化海水养殖园区建设提供可借鉴的发展思路;建立的池塘生物复合利用模式、工厂化-池塘耦合利用模式和大尺度滩涂湿地综合利用模式可有效减轻养殖园区近海富营养化程度、改善海域生态环境,达到生态修复和渔业发展的双赢;形成的海水养殖生产安全控制技术将有利于提高养殖产品的食品安全,促进海水养殖业持续健康发展,提升海洋经济的和谐发展能力;构建的海水养殖园区管理信息化技术是构建现代化海水养殖产业体系、提升海洋综合管控能力的重要手段。

^① “亩”为非法定单位,但在实际生产中经常使用,本书保留。1亩≈666.7平方米。

“规模化海水养殖园区环境工程生态优化技术集成与示范”研究成果的示范应用,符合我国现代养殖业发展的趋势,同时是响应《全国科技兴海纲要》中“扩大环境友好型养殖、水产品质量安全保障等技术的应用规模”和重点建设“海洋循环经济可持续发展模式示范区”等号召的重要举措,同时为我国实施的“蓝色海洋”战略和海洋生态文明建设提供技术示范。

“规模化园区海水养殖环境工程生态优化技术集成与示范”项目始于2012年12月,历经4年多的试验研究,先后在辽宁省大连市金砣集团、山东省滨州市海城水产科技集团、山东省滨州市友发水产集团、山东神力企业发展有限公司、山东省日照市的开航水产集团公司5处总面积3.5万亩的区域规划示范园区开展了环境工程生态优化技术的研究。通过理论创新、技术集成、工艺模式构建、产业化推广示范形成了一整套基于园区生态优化的技术体系。针对规模化园区点源式排放的产作方式,创新提出并构建了海水养殖园区点源排放—工程处理—生物修复—循环利用为一体的综合试验水处理工艺,发明了适用于大水面养殖病害综合生态防治的植物源免疫增强剂,研发了鱼病诊疗检索系统,建立了池塘养殖综合效益评估体系,并将各项技术应用于5个示范园区。本书的编写和出版得到国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目(201305005)和山东省农业重大应用技术创新课题等项目的资助,在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中参考了大量文献,并尽可能在书中列出。但由于篇幅的限制,有小部分文献未列出,敬请相关文献的作者谅解。

在本研究各项技术的研发与示范过程中,可能有设计规划和考虑不周的地方;加之水平和条件所限,本书难免存在不足,恳请读者批评指正。

张新

2017年5月

目 录

CONTENTS

第 1 章 海水养殖园区环境工程优化技术的理论创新 / 001

- 第 1 节 示范园区生物修复藻种的筛选研究 / 002
- 第 2 节 不同温度、光照和硝氮浓度对龙须菜无机磷吸收的影响 / 005
- 第 3 节 光照强度对海黍子生长及生化组成的影响 / 006
- 第 4 节 光照对脆江蕮生长及光合色素含量的影响 / 007
- 第 5 节 光照和温度对脆江蕮的生长和生化组成的影响 / 011
- 第 6 节 大型海藻苗种人工繁育技术的研究 / 016
- 第 7 节 鼠尾藻、海黍子池塘栽培繁育生态观察 / 019
- 第 8 节 鼠尾藻池塘栽培技术研究 / 021
- 第 9 节 海黍子池塘栽培技术研究 / 032
- 第 10 节 脆江蕮池塘栽培技术研究 / 035
- 第 11 节 龙须菜池塘栽培技术研究 / 043
- 第 12 节 底栖硅藻培养及对刺参生长的影响 / 047
- 第 13 节 鼠尾藻对刺参生长及水环境的影响 / 050
- 第 14 节 海黍子对仿刺参生长及水环境因子的影响 / 057
- 第 15 节 脆江蕮对仿刺参生长及水环境的影响 / 061
- 第 16 节 生物量比对新月菱形藻和两种大型海藻竞争的影响 / 067
- 第 17 节 微生态制剂对刺参养殖水体水质指标的影响 / 070
- 第 18 节 工厂化-池塘耦合利用模式水质变化 / 072
- 第 19 节 海水养殖池塘养殖排放水水化学特征研究 / 076
- 第 20 节 芦苇净化池塘养殖排放水效果研究 / 079
- 第 21 节 碱蓬净化池塘养殖排放水效果研究 / 083
- 第 22 节 芦苇湿地净化池塘养殖排放水效果研究 / 086
- 第 23 节 环境改良有益微生物菌株的富集、分离、筛选与鉴定 / 089
- 第 24 节 渔用微生物菌株分离鉴定与安全性实验 / 095
- 第 25 节 对虾养殖池中有益芽孢杆菌的分离鉴定、降解条件优化和安全性评估 / 101
- 第 26 节 虾蟹养殖池生物絮团中有益菌的分离鉴定、降解条件优化和安全性评估 / 105
- 第 27 节 养殖环境清洁高效复合微生物制剂筛选的研究 / 108
- 第 28 节 刺参养殖池塘芽孢杆菌的鉴定及其发酵条件研究 / 110

- 第 29 节 复合微生态制剂对海水养殖池塘水质的影响研究 / 117
- 第 30 节 凡纳滨对虾在盐度胁迫下免疫响应机制的研究 / 120
- 第 31 节 刺参夏眠过程中神经内分泌-能量代谢信号通路的研究 / 125
- 第 32 节 多环芳烃(苯并[a]芘和屈)对凡纳滨对虾免疫的影响 / 131
- 第 33 节 多环芳烃(苯并[a]芘)对凡纳滨对虾抗氧化系统的影响 / 134
- 第 34 节 凡纳滨对虾在多环芳烃(苯并[a]芘)胁迫下解毒代谢途径的研究 / 137
- 第 35 节 多环芳烃(苯并[a]芘)对凡纳滨对虾蓄积毒性效应 / 143
- 第 36 节 多环芳烃(苯并[a]芘)对凡纳滨对虾组织损伤效应的研究 / 145
- 第 37 节 中草药添加剂对凡纳滨对虾药效与安全性评价研究 / 147
- 第 38 节 对虾中草药免疫增强剂快速筛选技术的研究 / 157
- 第 39 节 对虾免疫增强和抗菌复方中草药制剂的研究 / 160
- 第 40 节 刺参植物源免疫增强剂的研发 / 164
- 第 41 节 免疫增强剂对仿刺参补体基因表达的影响 / 174
- 第 42 节 熊本牡蛎单体苗种生产技术研究 / 179
- 第 43 节 紫贻贝雌核发育二倍体的人工诱导研究 / 185
- 第 44 节 栉江珧 *Wnt4* 基因 cDNA 克隆表达及 17β -雌二醇调控作用研究 / 188
- 第 45 节 刺参 SNP 标记与生长性状的关联分析 / 197

第 2 章 海水养殖园区环境工程优化研究的技术集成 / 207

- 第 1 节 可再生能源现状调查与优化利用技术研究 / 208
- 第 2 节 液态氧、微孔增氧及纳米材料工程优化应用研究 / 210
- 第 3 节 残饵污染控制技术与工艺研究 / 212
- 第 4 节 养殖排水无害化处理设施与工艺研究 / 216
- 第 5 节 功能材料对富营养化水体水质的调控作用研究 / 225
- 第 6 节 功能材料对饵料微藻生长与光合作用的影响研究 / 228
- 第 7 节 功能材料对微生物的影响研究 / 231
- 第 8 节 参-藻海水养殖模式生态优化技术 / 233
- 第 9 节 虾-贝-藻海水养殖模式生态优化技术 / 234
- 第 10 节 微生态制剂在水质改良中的应用 / 236
- 第 11 节 大型海藻对刺参养殖水质的影响研究 / 237
- 第 12 节 养殖环境生态优化调控技术集成研究 / 238
- 第 13 节 微生态制剂在水质改良中的应用 / 239
- 第 14 节 凡纳滨对虾在低盐胁迫下鳃丝基因表达谱的构建与分析 / 241

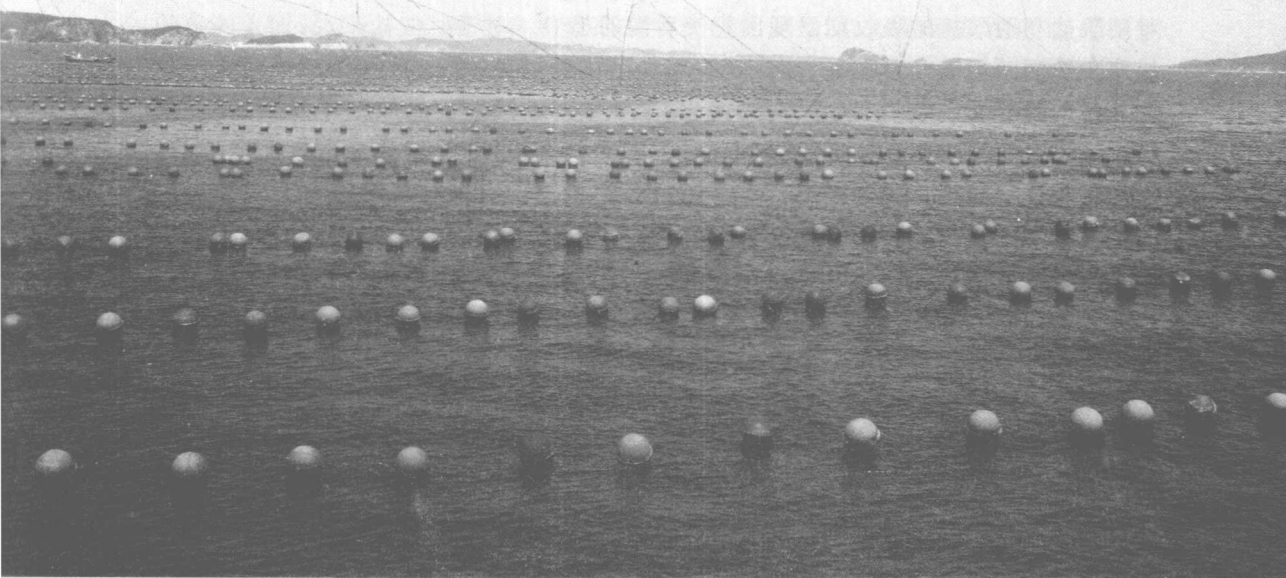
第 3 章 海水养殖园区环境工程优化技术的工艺模式构建 / 245

- 第 1 节 不同养殖模式下不同时间水质变化与水体微生物多样性变化 / 246
- 第 2 节 有益菌株间接酶联免疫(ELISA)快速检测技术的建立 / 253
- 第 3 节 有益菌的 Real-time PCR 快速检测技术的研究 / 258
- 第 4 节 凡纳滨对虾在盐度胁迫下免疫基因表达谱的构建与分析 / 263
- 第 5 节 参藻共生模式技术研究 / 267

第6节	池塘生物复合利用模式的构建	/ 269
第7节	黄河岛示范园区养殖环境有害因素的研究	/ 271
第8节	参藻混合养殖模式野外实验	/ 272
第9节	池塘生态、多元化养殖模式	/ 275
第10节	池塘一大尺度滩涂湿地综合开发模式构建	/ 278
第11节	海水养殖病害数据库资料的收集和整理	/ 281
第12节	海水养殖常见病害初诊速查检索表的编写	/ 302
第13节	“海水养殖病害初诊检索系统”的编制	/ 323
第14节	池塘养殖综合效益评价指标体系和数学模型构建研究	/ 327
第15节	基于14个指标的4种规模化园区海水养殖模式的效果评估报告	/ 338
第16节	基于6个指标的规模化园区生态化养殖模式综合效益评估报告	/ 352
第17节	池塘养殖综合效益评价系统计算机软件开发	/ 358
第4章 海水养殖园区环境工程优化技术的产业化推广应用及示范		/ 369
第1节	免疫增强剂的推广示范工作	/ 370
第2节	渔用抗生素安全评估与中草药替代技术研究	/ 372
第3节	常见池塘养殖模式效益调查与分析	/ 379
第4节	刺参池塘养殖现状调查报告	/ 393
第5节	刺参大棚保苗现状调查报告	/ 397
第6节	示范区现状调查及升级改造方案	/ 400
第7节	海水养殖环境工程生态化园区管理体系	/ 423
第8节	海水养殖园区环境工程生态优化技术操作规程	/ 454
参考文献		/ 471

第1章

海水养殖园区环境工程 优化技术的理论创新



第1节 示范园区生物修复藻种的筛选研究

1. 营养盐对不同海藻生长的影响

本研究测定了鼠尾藻、真江蓠、脆江蓠、蜈蚣藻在不同营养盐浓度梯度下的生长及对营养盐的吸收情况。

测定结果显示:真江蓠的生物量在不同的营养盐浓度下均持续增加,并且随着加入的营养盐浓度的升高,生物量的增长量也增加。而对于磷酸盐来说,在实验期间,所有真江蓠质量均持续增加。在培养期间,真江蓠的相对生长速率都随时间呈直线升高;并且加入的营养盐浓度越高,真江蓠相对生长速率增加得越快。真江蓠对硝酸盐和磷酸盐的吸收均呈现出先快后慢的趋势。对于硝酸盐来说,加入的硝酸盐在实验期间均被完全吸收,并且随着添加浓度的增加,完全吸收所消耗的时间越长;同时,随着加入的硝酸盐浓度的增加,真江蓠对硝酸盐的吸收速率越大,且在硝酸盐耗尽之前其浓度都呈直线降低。对于磷酸盐来说,随着磷酸盐浓度的增加,真江蓠对磷酸盐的吸收速率增加。在实验过程中添加的磷酸盐均被耗尽。磷酸盐的浓度随时间的变化趋势与硝酸盐相同。

测定结果显示:脆江蓠生物量在不同氮磷组中随着时间的推移呈直线增加的趋势,并且随着加入的营养盐浓度的增加,生物量的增加量也在增大。不同氮磷组的脆江蓠相对生长速率在前2 d基本保持不变,之后开始迅速增大。营养盐浓度的变化情况与真江蓠相似。

测定结果显示:蜈蚣藻在不同氮磷组中生物量随着时间增加。在不同硝酸盐浓度下,生物量的增量随着添加的硝酸盐浓度的增大而增大,但所有组都在2 d之后生物量的增长速率降低。而在不同磷酸盐浓度下,蜈蚣藻生物量的增加也随着加入磷酸盐的浓度的增加而增大,但在实验末期生物量也会达到平台期。在不同氮磷浓度下,相对生长率都在培养第1 d高,第2 d急剧降低,之后会随着时间的推移逐渐升高。

测定结果显示:鼠尾藻在不同硝酸盐浓度下生长情况相似,相对生长速率的变化情况也相似。随着时间的推移,不同硝酸盐浓度下鼠尾藻的湿重呈现出明显的增加,并且相对生长速率也增大。但是随着硝酸盐浓度的增加相对生长速率略有增大。不同硝酸盐浓度下,硝酸盐耗尽的时间也不相同。前4组硝酸盐都在第2 d耗尽。第5组即硝酸盐浓度最高的那组,硝酸盐在第4 d耗尽。不同磷酸盐浓度下鼠尾藻的生长及营养盐吸收情况待明年春季进行。

对比以上几种藻在实验前后的生物量可以发现,在不同氮、磷浓度下几种藻生物量的增加量都是脆江蒿>真江蒿>蜈蚣藻,即脆江蒿对吸收的营养盐利用率最高。

2. 不同海藻的营养盐吸收动力学

本研究对鼠尾藻、真江蒿、脆江蒿、龙须菜在不同营养盐浓度梯度下进行了营养盐的吸收动力学实验。

实验结果显示:脆江蒿对硝酸盐的吸收速率呈现出升高后降低的趋势,在前2 h呈现出升高的趋势,随后开始迅速降低,但是8 h以后吸收速率保持不变。脆江蒿对于磷酸盐的吸收速率则出现了不同的趋势。在前10 h,营养盐浓度较低的2组对磷酸盐的吸收速率呈现出持续下降的趋势,但浓度较高的3组则呈现出吸收速率先升高后降低的趋势,即在前4 h吸收速率波动上升,随后开始降低;实验进行10 h后,脆江蒿对磷酸盐的吸收速率进入稳定期。

实验结果显示:在不同硝酸盐浓度下真江蒿对硝酸盐的吸收速率在前6 h急剧降低,6 h后变化不大;同时随着硝酸盐浓度的增大,吸收速率也随之增加。对磷酸盐的吸收速率与对硝酸盐的吸收趋势基本一致,也是对磷酸盐的吸收速率随磷酸盐浓度的增加而增大;在前6 h吸收速率迅速降低,6 h后吸收速率变化不大。

实验结果显示:在硝酸盐含量最高的2个组的龙须菜,对硝酸盐的吸收速率呈现出先升高再降低的趋势,具体为在前2 h龙须菜对硝酸盐的吸收速率呈现出升高的趋势,而在2~8 h吸收速率又开始持续降低,8 h后吸收速率变化不大。对于磷酸盐含量较低的3个组,吸收速率都在前8 h迅速降低,8 h后变化不大。在不同磷酸盐浓度梯度下,磷酸盐浓度为 $0.9 \mu\text{mol/L}$ 和 $1.2 \mu\text{mol/L}$ 的2组的磷酸盐吸收速率较为相似且明显高于其他组。

实验结果显示:鼠尾藻对硝酸盐的吸收速率最大值出现在实验开始后的1 h,随后吸收速率随着时间的推移而急剧降低,在10 h后吸收速率基本稳定。对磷酸盐的吸收速率随磷酸盐的浓度变化而变化,磷酸盐浓度为 $1.2 \mu\text{mol/L}$ 的一组对磷酸盐的吸收速率明显高于其他组,对于磷酸盐的吸收速率在实验开始后8 h达到平衡。吸收速率常数根据米氏方程计算所得,24 h内鼠尾藻对硝酸盐的吸收规律可以近似用一级动力学方程进行描述。从吸收速率可以看出,当硝酸盐浓度为 $10 \sim 30 \mu\text{mol/L}$ 时,吸收速率随着硝酸盐浓度的增加而增大,但随着硝酸盐浓度的继续增加,吸收速率反而降低。说明硝酸盐浓度约为 $30 \mu\text{mol/L}$ 时,对硝酸盐的吸收最快。

3. 鼠尾藻生长情况

在不同硝酸盐含量下,鼠尾藻的生长情况相似,相对生长速率的变化情况也相似。随着时间的增加,不同硝酸盐浓度下鼠尾藻的湿重呈现出明显的增加,并且相对生长速率也增大。但是随着硝酸盐浓度的增加相对生长速率略有增大。

通过以上分析,综合比较24 h内这4种藻对不同营养盐的吸收速率发现,对硝酸盐的吸收速率,鼠尾藻最高,其次是龙须菜和真江蒿。龙须菜和真江蒿的平均吸收速率相似;硝酸盐浓度为 $10 \sim 20 \mu\text{mol/L}$ 时龙须菜的吸收速率较大,浓度为 $20 \sim 60 \mu\text{mol/L}$ 时,真江蒿对硝酸盐的吸收速率较大。对硝酸盐吸收速率最小的是脆江

藻。对于磷酸盐来说,真江藻的吸收速率最大,然后依次是脆江藻、鼠尾藻和龙须菜。在利用大型藻进行生态修复的时候可以根据不同大型藻的不同营养盐吸收特征进行选择。

4. 温度和光照对脆江藻(*Gracilaria chouae*)吸收氨氮、磷酸盐的影响

研究结果显示,温度在 $5^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、光照在 $2\,000\text{ lx}\sim 4\,000\text{ lx}$ 之间氨氮的吸收率差异不显著,但 $0\sim 500\text{ lx}$ 与 $2\,000\sim 4\,000\text{ lx}$ 两个区段之间氨氮吸收率差异显著。随着光照的增加,对氨氮的吸收率增加。温度对氨氮吸收率的影响不显著。脆江藻对磷酸盐的吸收率随温度升高而升高,并在 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 吸收率较好;光照对磷酸盐吸收率无明显规律。实验观察到在 5°C 时,即使在完全黑暗状态下脆江藻也可保持正常状态,只是藻体鲜重减少。脆江藻适宜的生长温度为 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$,适宜的光照条件为 $500\sim 4\,000\text{ lx}$ 。如果是为了冬季保种, $5^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 、光强 $4\,000\text{ lx}$ 以下比较安全;当温度为 20°C 、光强达到或超过 $4\,000\text{ lx}$,脆江藻尖端容易变白。光照显著影响脆江藻对氨氮的吸收,但对磷酸盐的吸收影响无明显规律。温度对脆江藻吸收氨氮的影响不明显。温度对脆江藻吸收磷酸盐吸收的速率有极显著的影响,在 $15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 时磷酸盐吸收率较高。不管从脆江藻吸收氮、磷能力方面还是从生长速度方面来看,脆江藻比较适合在较高的温度下培养,而其对光照要求较低。由于实验条件限制,没有做更高温度,有待后续实验补充。

5. 大型海藻的氮、磷去除实验

实验材料 6 种:马泽藻(*Mazzaella japonica*);孔石莼(*Ulva pertusa* Kjellman);鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*);红毛菜(*Bangia fusco-purpurea*);蠕枝藻(*Helminthocladia australis*);拟伊藻(*Ahnfeltiopsis flabelliformis*)

实验结果显示:马泽藻和孔石莼对氨氮的去除效果较好,分别吸收了培养水体中氨氮初始总量的 98.0% 和 97.1% 。除鼠尾藻之外,其他 5 种海藻培养水体中氨氮浓度与培养时间具有很好的线性关系。孔石莼和马泽藻对硝酸盐氮的去除效果较好,分别吸收了培养水体中硝酸盐氮初始总量的 82.0% 和 76.9% 。6 种海藻培养水体中硝酸盐氮浓度与培养时间都表现出良好的线性相关。马泽藻和石莼对活性磷的去除效果较好,分别吸收了培养水体中活性磷初始总量的 90.8% 和 86.9% 。马泽藻、蠕枝藻和鼠尾藻培养水体中活性磷浓度与培养时间呈线性相关。

在前期筛选潮间带藻种的基础上,继续开展潮下带的藻种筛选工作,已经开展了海带和鼠尾藻在不同温度和盐度的条件下吸收氮、磷营养盐的研究工作,具体研究内容:设定 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C 四个温度梯度和 20 、 25 、 30 、 35 四个盐度梯度,研究海带和鼠尾藻在这些条件下的氮、磷吸收能力,目的在于研究它们在不同的生态因子影响下对富营养化海水的净化作用,为在池塘栽培这些大型海藻以达到最佳修复效果提供参考。

第2节 不同温度、光照和硝氮浓度对龙须菜无机磷吸收的影响

为了探讨龙须菜对无机磷吸收的基本特征以及温度、光照和硝氮浓度对其的影响,本研究在实验室条件下,分别设置3个不同温度(15℃、23℃和31℃)、3个不同的光照强度[0 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]和3个不同的硝氮浓度(0 $\mu\text{mol/L}$ 、30 $\mu\text{mol/L}$ 和200 $\mu\text{mol/L}$),在不同的条件下测定龙须菜的无机磷吸收动力学曲线。

1. 温度的影响

实验结果显示:龙须菜对无机磷的吸收速率随着温度的升高而增大,同时最大吸收速率和半饱和常数也与温度成正相关, V_m/K_s 在较低的温度下(15℃)的值反而最大。可见,温度的升高可以提高龙须菜对无机磷的吸收能力,同时,温度越低,龙须菜对无机磷的亲合力越大,且较低的无机磷浓度下龙须菜的吸收效率更高。

2. 光强的影响

实验结果显示:龙须菜对Pi吸收的最大速率和 V_m/K_s 比值在光强为30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时最大,黑暗和高光强下都相对较低,而半饱和常数趋势则相反。由此可知,相对于30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的低光强,黑暗和高光强下都会使龙须菜对Pi的吸收能力和吸收效率降低,并使其对底物的亲和力减弱。

3. 硝氮浓度的影响

实验结果显示:硝氮浓度的增大使龙须菜对无机磷的最大吸收速率逐渐增大,半饱和常数也表现出相同的趋势,但 V_m/K_s 在30 $\mu\text{mol/L}$ 的硝氮浓度下最高,在0 $\mu\text{mol/L}$ 和高硝氮浓度下的值都相对较低。可见,随着硝氮浓度的增大,龙须菜对无机磷的吸收能力增强,对底物的亲和力降低,但吸收效率却在接近自然海水的硝氮浓度(本实验所用自然海水的硝氮浓度为40 $\mu\text{mol/L}$)条件下最大。

实验结果表明:龙须菜对无机磷的吸收动力学曲线符合典型的米氏方程特征,并且吸收能力随温度和硝氮浓度的升高而增强,吸收效率在较低温度(15℃)和接近自然海水的硝氮浓度条件(30 $\mu\text{mol/L}$)下较高;低光强下[(30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]的吸收能力和吸收效率均高于黑暗和高光强条件[(200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)]。

大型经济海藻龙须菜对于无机磷的吸收有着适合的温度和光强:温度的升高能够刺激无机磷的吸收,但吸收效率在达到一定温度时就不再升高;合适的光强下,龙须菜对磷的吸收能力和效率都达到最高,光强太高对磷的吸收会起到负面影响。因此,在养殖龙须菜时应考虑与温度和光强相关的因素,如水温、养殖悬挂深度等。另

外,水体中氮的充分供应能够刺激龙须菜对磷的更快吸收,二者的吸收速率呈现一定的正相关。当前近海海水富营养化现象严重,水体中氮、磷浓度同时升高,我们的这一结论为养殖龙须菜来修复富营养化海水提供了理论上的支持。

第 3 节 光照强度对海黍子生长及生化组成的影响

1. 材料与方法

海黍子于 2011 年 12 月采自荣成湾。选取健康藻体,用海水洗刷掉浮泥杂藻后,置于塑料水槽中预培养[培养条件为温度 5℃、光照强度 40 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]1 周后,筛选生长健壮的藻体尖端,剪成 3~5 cm 长的藻体,置于 3 000 mL(内含 2 500 mL 消毒海水培养液)三角烧瓶培养,在培养液中添加氯化铵及磷酸二氢钾,使培养液氮、磷的初始浓度分别为 0.44 mg/L 及 0.044 mg/L。培养条件为 10℃,光照周期 L:D=12 h:12 h,盐度为 31,pH 为 8.0)。设 5 个光照梯度[20 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、40 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、80 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、120 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],每个处理 4 个平行。每瓶加入的藻体质量为 2.00 g $\pm$ 0.02 g,充气培养。测定藻体特定生长率及生化组成。

2. 研究结果

从表 1-1 可以看出,光照为 80~200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,海黍子各处理组的特定生长率都比较高,且无显著差异。光照低于 80 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,生长率较小。

从研究结果(表 1-2)可以看出,光照强度对海黍子叶绿素 a 有显著的影响($P<0.05$)。特别是光照 20 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的叶绿素 a 含量显著高于其他光照条件。光照 40~80 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间无显著差异,光照 120~200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间无显著差异。但总的趋势是叶绿素 a 的含量都随着光照强度的增加而减小。

表 1-1 光照对海黍子生长的影响($n=4$)

光照/ $[\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$	光照强度对海黍子日特定生长率的影响/%							
	0~3 d	3~6 d	6~9 d	9~12 d	12~15 d	15~18 d	18~21 d	0~21 d
20	1.4 $\pm$ 0.45a	1.39 $\pm$ 0.25a	1.31 $\pm$ 0.52a	2.42 $\pm$ 0.83a	3.39 $\pm$ 0.13	2.42 $\pm$ 0.40a	3.07 $\pm$ 0.44a	2.02 $\pm$ 0.26a
40	2.68 $\pm$ 0.09b	2.98 $\pm$ 0.57b	2.55 $\pm$ 0.58b	2.95 $\pm$ 0.77a	3.04 $\pm$ 0.62	3.14 $\pm$ 0.40b	3.04 $\pm$ 0.31a	2.9 $\pm$ 0.12b
80	3.06 $\pm$ 0.45c	3.34 $\pm$ 0.51b	3.24 $\pm$ 0.40bc	4.08 $\pm$ 0.77c	3.97 $\pm$ 0.91	4.13 $\pm$ 0.48c	5.22 $\pm$ 0.55b	3.84 $\pm$ 0.50c
120	2.63 $\pm$ 0.31b	3.90 $\pm$ 0.81b	3.58 $\pm$ 0.60c	3.77 $\pm$ 0.62c	3.98 $\pm$ 0.85	4.17 $\pm$ 0.66c	4.40 $\pm$ 0.64b	3.87 $\pm$ 0.17c
200	1.07 $\pm$ 0.12a	3.34 $\pm$ 0.58b	4.05 $\pm$ 0.77c	4.31 $\pm$ 0.38c	3.76 $\pm$ 0.27	4.28 $\pm$ 0.17c	4.89 $\pm$ 0.36b	3.72 $\pm$ 0.27c

注:同一列不同字母(a、b、c、d、e)表示经多重检验相互之间的差异显著, $P<0.05$

表 1-2 不同光照强度下海黍子的生化组成

光照强度 /[$\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	叶绿素 a /(mg/g, wet)	叶绿素 b /(mg/g, wet)	可溶性蛋白质 /(mg/g, dry) ^a	可溶性糖 /(mg/g, dry)	褐藻多酚 /(mg/g, dry)	含水量/%
20	0.20±0.00a	0.26±0.01a	15.93±0.56a	16.72±1.18a	6.77±0.66a	81.73±0.63
40	0.18±0.01b	0.24±0.01ab	15.20±0.43a	13.38±0.68b	6.04±0.78a	80.89±0.54
80	0.18±0.00b	0.23±0.01b	13.98±1.15ab	14.77±0.86b	6.42±0.45a	79.16±1.69
120	0.16±0.00c	0.21±0.01b	13.52±1.22ab	13.40±1.55b	4.65±0.41b	80.04±1.51
200	0.14±0.01d	0.20±0.02b	12.94±0.51b	14.07±0.60b	13.06±0.65c	79.10±0.52

注：同一列不同字母(a、b、c、d、e)表示经多重检验相互之间的差异显著， $P<0.05$

最低光照组[20 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]的可溶性蛋白含量显著高于最高光照组[200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]，其余组蛋白质含量之间无显著性差异($P>0.05$)。

海黍子中可溶性糖在光照为 20 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下含量最高，其余各处理组之间无显著差异($P>0.05$)。

光照在 20~80 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，褐藻多酚含量变化不显著，当光照增加到 120 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，褐藻多酚含量降到最低，但若继续增加光照，使其达到 200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，褐藻多酚含量急剧增加。

第 4 节 光照对脆江蓠生长及光合色素含量的影响

1. 材料与方法

脆江蓠于 2012 年 2 月 28 日采于福建宁德罗源湾人工养殖海区，用泡沫箱包装，于 4℃~8℃低温下，24 h 内运回青岛实验室。在实验室中将脆江蓠藻体用清洁海水冲洗干净，剔除杂质。在室温、光强约为 80 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的玻璃水槽中充气预培养 4 d 后，选取健康的藻体进行实验。实验前，用消毒海水冲洗干净，剪成 2~3 cm 藻段，用 1 000 mL 三角瓶进行培养。每瓶内盛 800 mL f/2 培养液(培养海水煮沸消毒)(Guillard, 1975)，加入 1.5 g 藻体，且每瓶中藻体尖端、中部和基部的藻段数量相当。设置 40 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、80 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、120 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、160 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 5 个光照处理组，每组 3 个平行。在光周期为 12L:12D，温度 20℃的光照培养箱中充气培养，每周更换培养液两次。光合色素含量实验依照相同条件处理。共培养 28 d，每隔 7 d 测定一次鲜重和光合色素含量，培养 28 d 后测藻体干重。另外，在预培养结束时进行光合速率的测定。

2. 结果

(1) 光照对脆江蓠相对生长率的影响。

各组脆江蓠 28 d 中的相对生长率见图 1-1。如图所示，40 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

光照条件下,脆江蓠相对生长速率虽有上升但均为负值;随着培养时间的延长,80~120 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照下,相对生长速率呈现下降的趋势;160~200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照下,相对生长速率呈现先升后降的趋势。培养7 d时,120 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理组的相对生长速率较大;14 d时,高光强[160~200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]处理组的相对生长速率较大,200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理组的相对生长速率最大;培养21 d,160 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理组的相对生长速率最高,高光强[160~200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]处理组的相对生长速率显著高于其他处理组;培养28 d,各组随光照增强,相对生长速率不断增大。

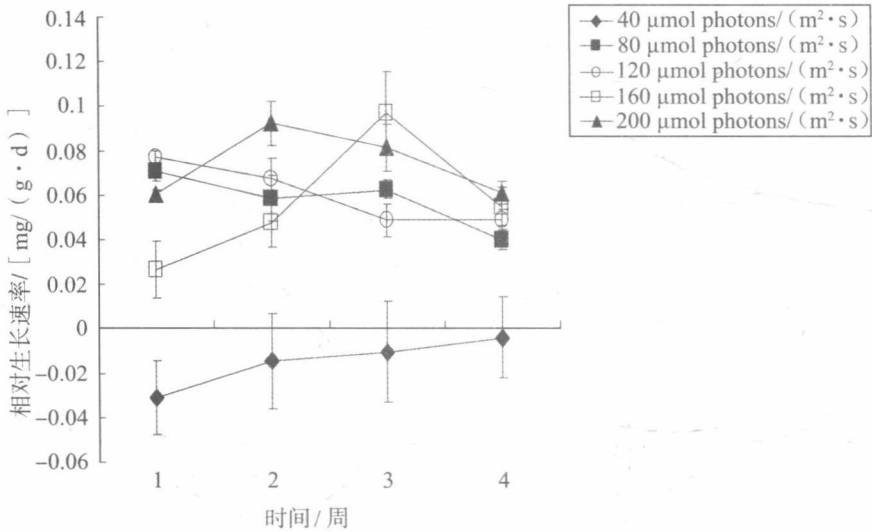


图 1-1 不同光照条件下脆江蓠的相对生长速率

(2) 光照对脆江蓠干重的影响。

培养28 d称量各组脆江蓠的干重见图1-2。图1-2显示,随着光照的增强,藻体的干重不断增大(图1-2)。光照200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,藻体干重最大,达1.27 g。数据的差异性分析结果显示,干重在组间差异显著:光照40 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时藻体干重显著低于其他各组($P<0.05$),光照200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时藻体干重显著高于其他各组($P<0.05$)。

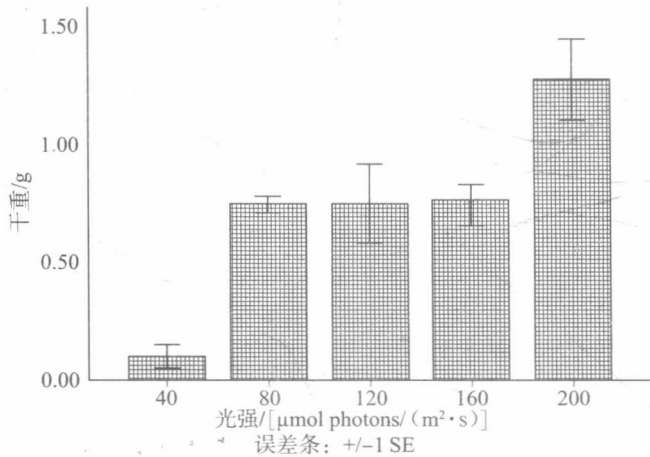


图 1-2 不同光照条件下脆江蓠的干重