

条斑紫菜对胶州湾湿地浅海富营养化状况的生物修复效果

陈聚法 赵俊 过锋 张艳 夏斌

(农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室

中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘 要 对胶州湾湿地海域条斑紫菜 *Porphyra yezoensis* Ueda 养殖区水环境进行了现场调查和研究,对紫菜生长吸收 N、P 营养盐的效果进行了实验研究,在此基础上综合分析紫菜对富营养化海水的生物修复效果。研究表明,条斑紫菜养殖对胶州湾湿地海水中过剩的营养盐有明显的控制作用,养殖区氮、磷营养盐和有机碳含量以及水质营养指数均低于周边对照区。实验条件下,紫菜生长吸收 N、P 营养盐和降低海水富营养化程度的效果显著。各实验周期水体中的无机氮含量下降幅度为 17.15%~21.26%,活性磷酸盐含量下降幅度为 55.73%~61.12%,表明紫菜叶状体生长对磷的吸收量明显高于对氮的吸收量。另外,各换水周期实验海水的营养指数值由 2.211~2.592 降至 0.749~0.873,降低幅度为 63.32%~69.39%,海水富营养化等级由“中度富营养”降至“贫营养”。根据胶州湾湿地海域的环境条件,通过大规模栽培大型海藻,可大量去除海水中的 N、P、C 等生源要素,有效降低海水富营养化水平。

关键词 条斑紫菜 海水富营养化 生物修复 胶州湾湿地

中图分类号 X55 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)01-0093-09

Study on bioremediation effects of *Porphyra yezoensis* on eutrophic condition in the seawaters of Jiaozhou Bay wetland

CHEN Ju-fa ZHAO Jun GUO Feng ZHANG Yan XIA Bin

(Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment,

Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture,

Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT The quality of seawater in *Porphyra yezoensis* culturing area in the Jiaozhou Bay wetland was surveyed and studied. Experimental study on the uptake effectiveness of nutritional elements such as nitrogen and phosphorous by *P. yezoensis* was carried out. According to the surveyed and experimental results, the bioremediation effects of *P. yezoensis* on eutrophic seawater was analyzed comprehensively. The results showed that there was an obvious reducing effect on the residual nutrients in seawater of the Jiaozhou Bay wetland by cultivating *P. yezoensis*. The contents of nitrogen, phosphorous and organic carbon as well as eutrophication

国家海洋公益性行业科研专项(200805066)和国家科技支撑计划课题(2009BADB7B02)共同资助

收稿日期:2011-06-10;接受日期:2011-07-05

作者简介:陈聚法(1964-),男,研究员,主要从事海洋渔业生态环境研究。E-mail:chenjfa@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85836341

index(EI) in culturing area were all lower than those in the control area. Under experimental conditions, *P. yezoensis* showed significant effectiveness on the uptake of nitrogen and phosphorous as well as reduction of eutrophication level. The decrease of content of dissolved inorganic nitrogen(DIN) was 17.15%~21.26% at the various experimental cycles and that of dissolved inorganic phosphorous(DIP) was 55.73%~61.12%, indicating that the uptake amount of DIP by *P. yezoensis* leafy thalli growth was obviously higher than that of DIN. In addition, the eutrophication level of water decreased from medium eutrophic with EI of 2.211~2.592 to oligotrophic with EI of 0.749~0.873 and the decrease rate of EI was 63.32%~69.39%. According to the natural environmental conditions of Jiaozhou Bay wetland, by cultivating seaweeds on a large-scale, the nutritional elements such as nitrogen, phosphorous and carbon can be removed in quantity and meanwhile the eutrophication level of seawater can be reduced efficiently.

KEY WORDS *Porphyra yezoensis* Seawater eutrophication Bioremediation
Jiaozhou Bay wetland

湿地被誉为“地球之肾”，是地球上水陆相互作用形成的独特的生态系统，与森林、海洋一起并列为全球三大生态系统(何奇瑾等 2008;何池全等 2001;崔保山等 2001)。胶州湾大沽河口滨海湿地是青岛市最大和最重要的滨海湿地，在抵御洪水、调节径流、改善气候、控制污染和维护区域生态平衡等方面发挥着重要作用。但受人为开发和自然变异等因素的影响，胶州湾湿地面积在不断缩小，湿地遭到一定程度破坏，部分功能丧失，再加上陆源污染和径流入海等因素的影响，胶州湾湿地生境呈现明显的退化趋势。据作者调查分析，胶州湾湿地海域主要的环境问题之一为海水富营养化。因此，建立因地制宜的海水富营养化生物修复技术是胶州湾湿地生态系统功能保护和生态修复的重要研究内容。

有关水质富营养化海域生物修复研究已有诸多成果，杨宇峰等(2003)分析认为，海带 *Laminaria japonica* Aresch、龙须菜 *Gracilaria lemaneiformis*、条斑紫菜 *Porphyra yezoensis* Ueda 等大型海藻在海洋生态系统碳循环和减缓富营养化方面有很重要的作用，大规模栽培大型海藻是减轻养殖区富营养化的有效途径之一。汤坤贤等(2005)在福建省东山岛近海水产养殖区进行了龙须菜对海水富营养化的生物修复研究，结果表明，龙须菜对富营养化的海水有良好的修复效果。曲克明等(2006)和赵先庭等(2007)进行了龙须菜、石莼 *Ulva lactuca* L. 和海带处理水产养殖废水的研究，结果表明，上述藻类去除氮、磷营养盐的效果明显，可用作大规模养殖废水的净化材料。毛玉泽等(2005)开展了大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用研究，认为大型藻类生物滤器是控制水体富营养化、增进食品安全和对污染水体进行生物修复的有效措施之一。郑杰民(2009)进行了应用龙须菜降低厦门海域海水中氮、磷的初步研究，结果表明，龙须菜吸收海水中的 N、P 效果相当显著。张寒野等(2005)对条斑紫菜养殖对海区中无机氮浓度的影响进行了分析研究，表明紫菜栽培可以降低整个海区的无机氮含量。杨晓玲等(2008)认为，养殖紫菜是控制水质富营养化的措施之一。

迄今为止，涉及胶州湾富营养化海域生物修复工作的报道很少。刘瑜等(2007)依托日本条斑紫菜养殖技术，将日本“菊花 A”条斑紫菜新品种成功引入我国，在胶州湾成功实现了育苗生产和海上栽培养殖。认为紫菜养殖可降低海水富营养化程度和保持生态平衡，具有良好的发展前景。但有关胶州湾富营养化海域生物修复技术研究未见报道。作者研究了条斑紫菜对胶州湾湿地浅海富营养化状况的生物修复效果，可为胶州湾湿地富营养化海域生物修复技术的建立提供技术支撑，对于胶州湾湿地退化环境的修复具有重要的理论和现实意义。

1 材料与方 法

1.1 研究海域

研究海域位于胶州湾西北部(图 1)。胶州湾兼具自然湿地和人工湿地双重属性,是胶东半岛一块具有典型性和稀有性的重要河口湾型湿地。因此,研究区域具有较好的代表性和重要的研究价值。

1.2 研究方法

1.2.1 胶州湾湿地海域紫菜养殖区水环境调查和分析研究

1.2.1.1 调查方法

调查区域位于胶州湾湿地海域 133 hm² 紫菜养殖区及其邻近海域(图 1),共设置 10 个调查站位,其中紫菜养殖区内 6 个(1~6 号),养殖区外 4 个(C1~C4 号,为对照点)。调查时间分别为 2010 年 10 月 15 日、11 月 10 日、12 月 12 日和 12 月 29 日,共 4 个航次。

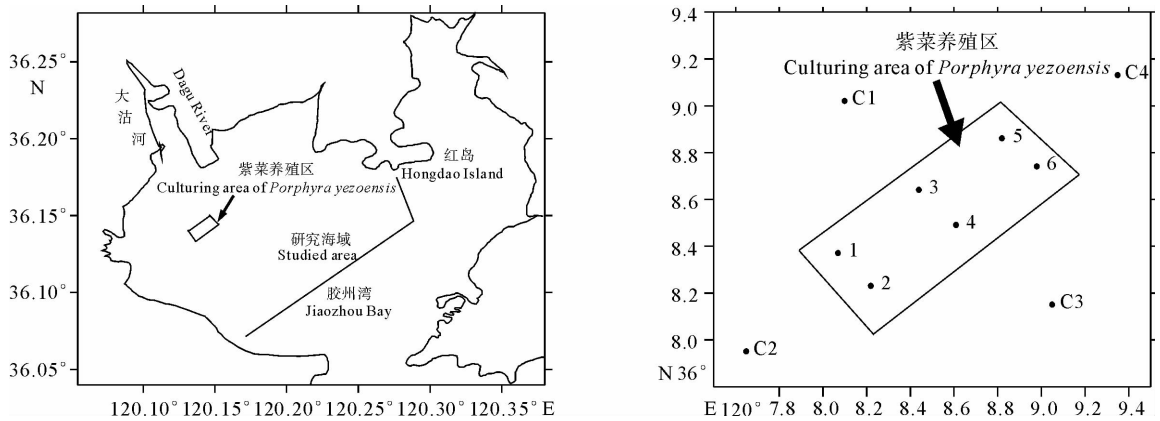


图 1 研究区域和紫菜养殖区水环境调查站位分布

Fig. 1 Studied area and sampling locations of water in *P. yezoensis* culturing region

调查项目包括无机氮(DIN)、活性磷酸盐(PO₄-P)、总有机碳(TOC)、化学需氧量(COD)、水温、盐度、溶解氧(DO)、pH。其中水温、盐度、溶解氧和 pH 以美国产 YSI 556 MPS 进行现场测定。其他指标:在现场采集水样后带回实验室进行含量检测,水样的采集、保存和检测方法均按 GB17378. 4-2007《海洋监测规范 第四部分:海水分析》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会 2007)的规定进行。其中无机氮中亚硝酸盐氮测定采用盐酸萘乙二胺分光光度法,检出限为 0.001 mg/L;硝酸盐氮测定采用镉柱还原法,检出限为 0.003 mg/L;氨氮测定采用靛酚蓝分光光度法,检出限为 0.005 mg/L;活性磷酸盐测定采用磷钼蓝分光光度法,检出限为 0.001 mg/L。上述营养盐测定所用仪器均为 7230G 型可见分光光度计。COD 测定采用碱性高锰酸钾法,检出限为 0.015 mg/L,所用设备为 25 ml 酸式滴定管。TOC 测定采用总有机碳仪器法,检出限为 0.03 mg/L,所用仪器为日本岛津公司 TOC-V_{CPH} 型总有机碳分析仪。

调查期间每次裁剪 150 cm×90 cm 的网帘 4 张,将网帘上附着的全部紫菜进行称重(湿重),以分析紫菜生长情况。由于 2010 年 10 月 15 日紫菜养殖尚未开始,因此本次调查未采集紫菜样品。以平均日增重(*I*)表示紫菜生长情况。

$$I = \frac{W_{i+1} - W_i}{D}$$

式中,*I* 表示紫菜平均日增重(g/m²·d),*W_i*、*W_{i+1}* 分别为第 *i* 次调查和第 *i*+1 次调查时采集紫菜样品的鲜重(g/m²),*D* 为相邻两次调查的时间间隔(d)。

计算结果显示,2010年11月10日~12月12日(下称第一阶段)紫菜平均日增重为 $23.16 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,12月12日~12月29日(下称第二阶段)紫菜平均日增重为 $21.78 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$,第一阶段略高于第二阶段。

1.2.1.2 评价方法和标准

采用营养指数法,对调查海域营养状况进行评价。其计算公式为:

$$EI = \frac{DIN \times DIP \times COD}{4\ 500} \times 10^6$$

式中, EI 为营养指数, DIN 为溶解态无机氮(mg/L), DIP 为溶解态无机磷(mg/L), COD 为化学需氧量(mg/L)。

水质富营养化等级划分标准:当 $EI < 1$ 时,为贫营养;当 $1 \leq EI < 2$ 时,为轻度富营养;当 $2 \leq EI < 5$ 时,为中度富营养;当 $5 \leq EI < 15$ 时,为重富营养;当 $EI \geq 15$ 时,为严重富营养(中华人民共和国环境保护部2008)。

1.2.2 紫菜生长对N、P生源要素吸收效果的实验研究

1.2.2.1 实验组设置

设置3个不同紫菜数量实验组和1个对照组,另设两个平行系列,共12个实验组(表1)。实验缸为圆柱形,底部面积为 1.0 m^2 ,缸内海水体积为 0.7 m^3 ,各实验组网帘(已附着紫菜叶状体)用竹架固定后置于实验缸中(图3)。

1.2.2.2 实验方法

实验用条斑紫菜取自胶州湾湿地海域紫菜养殖区,实验海水为红石崖近岸自然海水。6d为一换水周期,换水量为100%。换水前和换水后,以YSI 556 MPS现场测定水温、盐度、溶解氧和pH,并采集实验缸内水样、带回实验室,按照GB17378.4-2007《海洋监测规范 第四部分:海水分析》规定的方法进行 DIN 、 $PO_4\text{-P}$ 和 COD 含量检测,具体测定方法同上。光照为室外自然光照,实验期间每天将紫菜干露2h,既模拟了海上潮涨、潮落自然环境状况,也保证了紫菜的正常生长。

表1 紫菜对N、P生源要素吸收效果研究的实验设计

Table 1 Experimental design on the uptake of nutritional elements by *Porphyra yezoensis*

实验组编号 Number of experimental group	网帘尺寸 Mesh size (cm×cm)	实验开始时紫菜鲜重 Weight of <i>P. yezoensis</i> when starting experiment(g, wet)
C1	/	0
P1-1	70×70	92.65
P1-2	75×75	106.38
P1-3	80×80	121.01
C2	/	0
P2-1	70×70	92.99
P2-2	75×75	105.64
P2-3	80×80	120.38
C3	/	0
P3-1	70×70	91.77
P3-2	75×75	107.43
P3-3	80×80	122.26



图2 条斑紫菜吸收生源要素实验

Fig. 2 Experiment on the uptake of nutritional elements by *P. yezoensis*

实验自 2010 年 11 月 5 日~11 月 29 日结束,持续时间为 24 d。实验期间每日两次定时测定实验缸内海水的温度、盐度、溶解氧和 pH 值,水温变化范围为 3.98~7.01℃,盐度为 30.12~30.15,溶解氧为 7.95~8.43,pH 为 7.87~7.91。

实验开始和结束时分别对各实验缸内的紫菜进行称量(天平感量为 0.01 g),根据称量结果,按以下公式计算紫菜相对生长率(SGR):

$$SGR = \left[\frac{W_2 - W_1}{W_2} \right] \times 100\%$$

式中, W_1 、 W_2 分别为实验开始和结束时的紫菜鲜重(g)。

结果表明,各实验组紫菜平均生长率(SGR)差异较小,SGR 变化为 29.28%~30.09%,平均值为 29.71%。

实验开始和结束时,分别采集紫菜样品进行组织中总氮和总磷的含量测定。总氮测定采用过硫酸钾氧化吸光光度法(吴建之等 2000),所用仪器为 Cary 50 型紫外-可见分光光度计,方法的相对标准偏差为 3.3%;总磷测定采用 GB/T 5009.87-2003《食品中磷的测定》中的分光光度法(中华人民共和国卫生部和中国国家标准化管理委员会 2003),检出限为 2 μg ,所用仪器为 7230G 型分光光度计。

1.2.2.3 实验数据的标准化处理

由于各实验组紫菜网帘的面积不同,无法对实验结果进行直接比较,因此首先计算每个实验组各个换水周期水体中 DIN、DIP 和 EI 值的下降幅度,然后折算成每 m^2 紫菜网帘条件下水体中 DIN、DIP 和 EI 值的下降幅度,最后计算同一个换水周期各项指标的平均下降幅度。

1.2.3 胶州湾湿地水体生源要素调查研究

调查区域为胶州湾湿地——大沽河感潮河段和潮间带区域(图 3),共设置 18 个调查站位,其中大沽河感潮河段 9 个(A~G),潮间带区域 9 个(CJD11~13, CJD41~43, CJD71~73)。水体生源要素调查指标包括总氮(TN)和总磷(TP)等, TN 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(国家环境保护局 1989),检出限为 0.05 mg/L,所用仪器为 Cary 50 型紫外-可见分光光度计; TP 测定采用钼酸铵分光光度法(国家环境保护局 1989),检出限为 0.01 mg/L,所用仪器为 7230G 型分光光度计。调查时间分别为 2009 年 2、4、6、8、10 和 12 月,共 6 个航次。

2 结果

2.1 条斑紫菜养殖对胶州湾湿地海水中生源要素的调控作用

胶州湾湿地海域紫菜养殖区内、外水环境调查与分析结果表明,4 次调查期间紫菜养殖区氮、磷营养盐和有机碳含量以及水质营养指数(EI)要低于周边对照区(图 4),经均数差异显著性检验,4 次调查期间养殖区和对照区 DIN 和 TOC 的平均含量均无显著性差异($P > 0.05$, 自由度 $df = n_1 - 1 + n_2 - 1 = 8$);2010 年 10 月 15 日调查期间,养殖区和对照区 DIP 平均含量和营养指数均值无显著性差异,其余 3 次调查期间 DIP 平均含量和营养指数均值则存在显著性差异($P < 0.05$, $df = 8$)。另外,紫菜养殖区水体溶解氧含量略高于对照区,而紫菜养殖区内、外 COD、pH、水温、盐度等指标则差异甚小(表 2)。虽然紫菜养殖可吸收水体中 N、P、C 等生源要素,而且可减轻海水富营养化程度,但因目前胶州湾紫菜养殖规模偏小,再加上在海洋水动力作用下 N、P、C 等生源要素源源不断地补充到紫菜养殖区,导致养殖区和对照区氮、磷、碳等生源要素的含量并无太大差异。

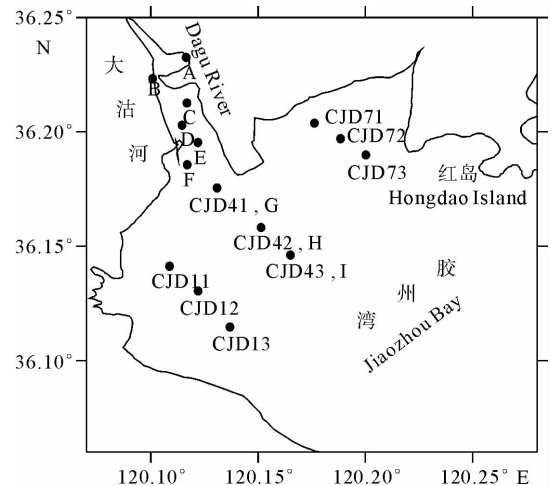


图 3 胶州湾湿地水体生源要素调查区域和站位分布
Fig. 3 Surveyed area and sampling locations of water samples for determining nutritional elements in the Jiaozhou Bay wetland

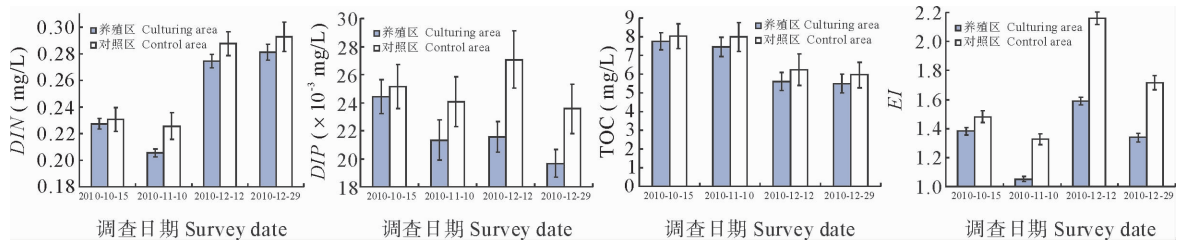


图4 养殖区和对照区水体中无机氮、活性磷酸盐和有机碳含量以及水质营养指数(EI)的差异

Fig. 4 Content difference of *DIN*, *DIP*, *TOC* and *EI* value between *P. yezoensis* culturing area and control area

表2 养殖区和对照区化学需氧量(COD)和水文参数的差异

Table 2 Differences of COD and hydrological factors between culturing area of *P. yezoensis* and control area

调查日期 Survey date	区域 Area	水环境指标 Water environmental indices				
		COD(mg/L)	T(°C)	S	DO(mg/L)	pH
2010-10-15	养殖区 Culturing area	1.12±0.02	15.12±0.04	30.31±0.02	6.48±0.25	7.78±0.01
	对照区 Control area	1.15±0.04	15.13±0.05	30.29±0.04	6.51±0.37	7.77±0.03
2010-11-10	养殖区 Culturing area	1.08±0.02	5.72±0.02	30.43±0.02	6.78±0.31	7.81±0.02
	对照区 Control area	1.10±0.03	5.74±0.04	30.41±0.05	6.51±0.46	7.79±0.04
2010-12-12	养殖区 Culturing area	1.21±0.03	3.67±0.01	31.02±0.03	8.74±0.55	7.78±0.02
	对照区 Control area	1.25±0.04	3.70±0.03	30.98±0.06	8.52±0.76	7.75±0.06
2010-12-29	养殖区 Culturing area	1.09±0.03	1.52±0.01	31.14±0.04	8.95±0.43	7.81±0.03
	对照区 Control area	1.12±0.04	1.54±0.02	31.12±0.06	8.78±0.72	7.77±0.07

条斑紫菜养殖期间,随着时间的推移,养殖区/对照区水体中无机氮、活性磷酸盐和有机碳含量比值发生了一定程度的变化。挂帘(网帘已附着紫菜苗)前的10月15日,无机氮、活性磷酸盐和有机碳含量比均为最高,说明紫菜养殖前养殖区和对照区水体中N、P、C等生源要素基本呈均匀分布趋势;紫菜养殖期间,养殖区/对照区无机氮含量比以11月10日最低,12月12日次之,12月29日最高;活性磷酸盐含量比以11月10日最高,12月29日次之,12月12日最低;有机碳含量比以11月10日最高,12月29日次之,12月12日最低(图5)。由此可见,条斑紫菜丝状体(自挂帘之日起至11月10日,前期为紫菜丝状体,后期为紫菜叶状体;11月10日以后均为叶状体)以吸收氮为主,叶状体以吸收磷为主,丝状体和叶状体对碳的吸收无明显变化。12月29日前后,由于水温降至1.5℃左右,紫菜吸收生源要素的速率比前期明显降低。

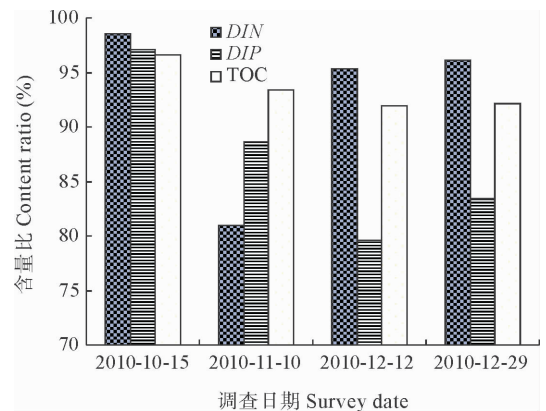


图5 养殖区、对照区无机氮、活性磷酸盐和有机碳含量比的变化

Fig. 5 Variation of content ratio of *DIN*, *DIP* and *TOC* between *P. yezoensis* culturing area and control area

2.2 紫菜生长对水体中N、P生源要素的吸收效果

2.2.1 条斑紫菜鲜菜中总氮和总磷的含量

总氮和总磷含量以紫菜湿重的百分含量表示(表3),实验开始和结束时间紫菜样品中总氮和总磷的含量变化很小,测得的紫菜鲜菜中含水量为83.26%。

2.2.2 实验期间水质营养指标和营养指数的变化

实验结果表明,紫菜生长吸收 N、P 营养盐效果显著。各换水周期实验水体中的无机氮含量下降幅度为 17.15%~21.26%,活性磷酸盐含量下降幅度为 55.73%~61.12%(表 4)。由此可见,紫菜叶状体生长对磷的吸收量明显高于对氮的吸收量。另外,各换水周期实验海水的营养指数(EI)值下降明显,EI 值由 2.211~2.592 降至 0.749~0.873,降低幅度为 63.32%~69.39%(表 4),海水富营养化等级由“中度富营养”降至“贫营养”。经均数差异显著性检验,不同换水周期的 DIN、DIP、EI 降幅均存在非常显著性差异($P < 0.01$, 自由度 $df = n - 1 = 8$),主要原因是实验期间水温降低(水温由 7.01℃降至 3.98℃)在一定程度上影响了紫菜的生长、减少了对氮、磷等营养盐的吸收。

综上所述,条斑紫菜生长期间对海水中 N、P 的吸收效果相当显著,可有效降低海水富营养化程度,为富营养化海域的理想修复生物。

3 讨论

上述的研究和分析结果表明,大型海藻养殖对富营养化的海水的修复效果明显。通过在水质富营养化海域大规模栽培大型海藻,可以有效减轻富营养化程度。

基于上述研究结果,从大型海藻大规模栽培入手,在构建海藻筏式养殖模式的基础上,来建立胶州湾湿地海水富营养化生物修复技术。

3.1 湿地环境修复生物品种的筛选和确定

龙须菜、条斑紫菜和海带等大型海藻栽培均具有有效减轻养殖海域富营养化程度的功能,因胶州湾湿地富营养化海域海图水深一般小于 2 m,成体海带藻体较长(一般在 2~6 m),水深不能满足海带的养殖要求,故海带不宜作为胶州湾湿地环境的修复生物品种。

龙须菜藻体长度一般为 20~50 cm,其最适生长水层为 0.5~1.0 m,水深 3 m 以内也能生存。生长适温范围较广,在 12~26℃的水温范围内都可生长,适宜水温为 18~22℃。生长最适盐度为 23~32,在 6~34 范围内均可生长。因此,经常有河水注入的、营养物质含量丰富、潮流畅通的内湾,比较适宜于龙须菜的生长(林星 2002;安鑫龙等 2009)。

条斑紫菜藻体长度一般为 30~50 cm,其适宜生长的海域为潮流畅通、有一定风浪、营养物质含量丰富的潮间带或浅海,生长的最适水温为 3~15℃,在 0.5~18℃水温下均能生长。其适盐范围较广,在盐度 13~33 的海水中均可生长。紫菜生长可分为叶状体和丝状体两个阶段,通常所见的紫菜即叶状体,叶状体养殖即为紫菜的养殖阶段。处于育苗阶段的紫菜为丝状体,丝状体耐高温、能自然度过夏秋高温期,秋末成熟时放出壳孢子,萌发成长为叶状体,叶状体在秋末、冬、春初低温下生长。条斑紫菜叶状体适宜水温较低,在 0.5~18℃均能生长,最适水温为 3~8℃(陈飞等 2005)。

自然生长的龙须菜主要产地在山东省和辽宁省近岸海域,为青岛市近海的“土著”品种。胶州湾条斑紫菜养殖已有成功的范例(刘瑜等 2007),其生长状况良好,产量稳定,经济效益高。与龙须菜和条斑紫菜的生

表 3 紫菜组织中总氮和总磷的含量

Table 3 Contents of TN, TP in tissue of *P. yezoensis*

日期 Date	2010-11-05	2010-11-29
总氮 TN(% ,m/m,wet)	0.645	0.637
总磷 TP(% ,m/m,wet)	0.063	0.061

表 4 实验期间无机氮、活性磷酸盐和营养指数的降幅

Table 4 Decreasing rate of DIN, DIP content and EI value during experiment

实验周期 Experiment cycle	降幅 Decreasing rate (%)			
	0~6d	6~12d	12~18d	18~24d
DIN	21.26±0.52	19.45±0.41	18.12±0.37	17.15±0.26
DIP	61.12±2.96	59.43±2.65	58.07±2.44	55.73±2.17
EI	69.39±3.51	67.32±3.34	65.67±3.01	63.32±2.81

态习性进行比较,可见胶州湾湿地富营养化海域水深、潮流、水温、盐度、营养盐等环境条件均可满足龙须菜和条斑紫菜的养殖要求,因此确定龙须菜和条斑紫菜为胶州湾湿地富营养化海水的修复生物品种。

3.2 胶州湾湿地富营养化海水的生物修复技术

3.2.1 大型藻类筏式养殖模式

养殖品种和养殖方式:在胶州湾湿地富营养化海域大规模筏养藻类龙须菜和条斑紫菜。

养殖区域和养殖规模:考虑到条斑紫菜和龙须菜养殖生长所需的水深和营养物质等条件和养殖筏架的阻流效应会影响海域的水交换能力,并避开航道、港口、海湾大桥等海上构筑物,其适养区域为中、低潮带和海图水深小于6 m的浅海区(图6),适养面积在0.667万 hm^2 左右。

养殖周期:综合考虑胶州湾湿地富营养化海域水温等自然环境条件的月际变化特点以及龙须菜和条斑紫菜各自的生态习性,采用轮养模式,每年11月至翌年3月,筏养适温范围较窄的低温品种——条斑紫菜;4月~10月筏养两茬适温范围广、具有一定耐高温能力的暖水性品种——龙须菜。

健康养殖技术:参照“新品种条斑紫菜的养殖技术”(刘瑜等 2007)和“龙须菜筏式养殖技术”(林星 2002)中规定的操作规程,实施藻类筏式健康养殖。

3.2.2 藻类养殖对胶州湾湿地富营养化海水的生物修复效果

采用构建的藻类健康养殖模式,可有效减轻胶州湾湿地海域的富营养化程度,取得明显的生物修复效果。

3.2.2.1 条斑紫菜和龙须菜对水体中N、P、C的去除量估算

条斑紫菜栽培产量一般为900~1000 kg/hm^2 (干重)(张寒野等 2005),按950 kg/hm^2 (干重)计;叶状体干湿重比介于0.15~0.20(童冠文 2010),按0.175计,换算成鲜菜产量为5428 kg/hm^2 。按栽培面积0.667万 hm^2 计算,每年总产量为362 $\times 10^5$ kg。叶状体鲜菜氮、磷、碳的含量分别为0.62%、0.06%、2.7%(杨宇峰 2003),据此计算得出,条斑紫菜收获后,每年从胶州湾湿地海域中移出氮、磷、碳的总量分别为224.44、21.72、977.40 t(表5)。

龙须菜干品产量一般在22.5 t/hm^2 ·茬以上(林星 2002),按栽培2茬、22.5 t/hm^2 ·茬计算,其产量为45 t/hm^2 (干重);龙须菜干湿重比介于0.08~0.10(林星 2002),按0.09计,换算成龙须菜鲜菜产量为500 t/hm^2 。按栽培面积0.667万 hm^2 计算,每年总产量为33.33 $\times 10^5$ t。龙须菜鲜菜氮、磷、碳的含量分别为0.25%、0.003%、2.5%(杨宇峰等 2003),据此计算得出:龙须菜收获后,每年从胶州湾湿地海域中移出氮、磷、碳的总量分别为8332.5、99.99、83325 t(表5)。

条斑紫菜和龙须菜收获后,合计每年从胶州湾湿地海域中移出氮、磷、碳的总量分别为8556.94、121.71、84302.40 t(表5)。

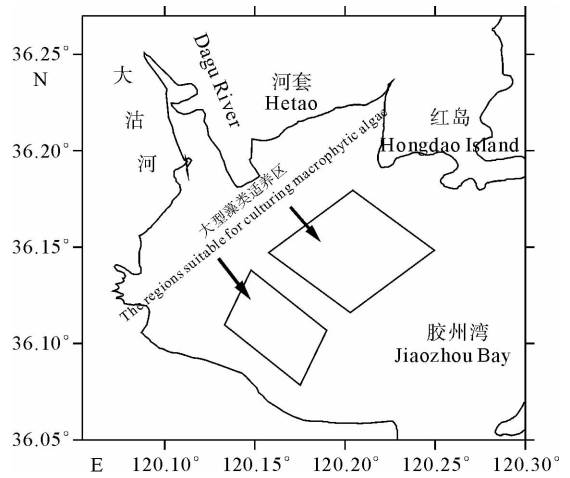


图6 胶州湾湿地富营养化海域大型藻类适养区
Fig. 6 The regions suitable for culturing seaweeds in the eutrophic sea waters of Jiaozhou Bay wetland

表5 胶州湾条斑紫菜和龙须菜栽培对水体中N、P、C的去除量
Table 5 Removal of TN, TP and TOC in seawater by culturing *P. yezoensis* and *Gracilaria lemaneiformis* in the Jiaozhou Bay

藻类品种 Seaweed species	去除量 Removal amount (t/a)		
	TN	TP	TOC
条斑紫菜 <i>P. yezoensis</i>	224.44	21.72	977.40
龙须菜 <i>G. lemaneiformis</i>	8332.50	99.99	83325.00
合计 Total	8556.94	121.71	84302.40

3.2.2.2 胶州湾湿地海域水体中 N、P 总量估算

调查数据统计结果显示,胶州湾湿地潮间带区域水体中 TN、TP 含量的年均值分别为 1.201、0.048 mg/L。胶州湾湿地海域面积为 200 km²左右,高潮位平均水深为 2 m 左右,按面积 200 km²、水深 2 m 计算得出,胶州湾湿地海域水体中含有的 TN 和 TP 总量分别为 46 118.4、1 459.2 t。

3.2.2.3 总体修复效果

估算结果表明,条斑紫菜和龙须菜收获后,每年从海域中移出的氮、磷总量占整个胶州湾湿地海域水体中 TN 和 TP 总含量的比例分别为 18.55%、8.34%,水质营养指数(EI)值降低 25.29%,EI 值由 2.67 降至 1.92,水质富营养化等级由“中度富营养”降至“轻度富营养”。由此可见,采用条斑紫菜和龙须菜筏式养殖模式,可大量去除海域中的 N、P、C,有效降低海水富营养化水平。

另外,养殖藻类收获后,可直接销售或加工成各类食品进行销售,具有较高的商业价值,而且不存在污染陆地环境的问题。因此,条斑紫菜和龙须菜是富营养化海水理想的修复生物,利用大型藻类进行富营养化海区的生物修复,环境、经济和社会效益俱佳,应用前景广阔。

参 考 文 献

- 毛玉泽,杨红生,王如才. 2005. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用. 中国水产科学,12(2): 225~231
- 中华人民共和国卫生部和中国国家标准化管理委员会. 2003. 食品中磷的测定(GB/T 5009.87-2003). 北京:中国标准出版社
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会. 2007. 海洋监测规范(GB 17378-2007). 北京:中国标准出版社
- 中华人民共和国环境保护部. 2008. 近岸海域环境监测规范(HJ 442-2008). 北京:中国环境科学出版社
- 曲克明,卜雪峰,马绍赛. 2006. 贝藻处理工厂化养殖废水的研究. 海洋水产研究,27(4):36~43
- 汤坤贤,游秀萍,林亚森,陈敏儿,沈东煜,林泗彬. 2005. 龙须菜对富营养化海水的生物修复. 生态学报,25(11):3 044~3 051
- 刘 瑜,纪培福. 2007. 新品种条斑紫菜的养殖技术. 齐鲁渔业,24(12):18~19
- 安鑫龙,齐遵利,李雪梅,张秀文. 2009. 大型海藻龙须菜的生态特征. 水产科学,28(2):109~112
- 陈 飞,张耀存,姜有山,冯家沛,张银意. 2005. 连云港海区养殖优质条斑紫菜原因研究. 气象科学,25(5):534~542
- 何池全,崔保山,赵志春. 2001. 吉林省典型湿地生态评价. 应用生态学报,12(5):754~756
- 杨宇峰,费修缙. 2003. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望. 青岛海洋大学学报,33(1):53~57
- 吴建之,葛 滢,王晓月. 2000. 过硫酸钾氧化吸光度法测定植物总氮. 理化检验-化学分册,36(4):166~167
- 何奇瑾,周广胜,周 莉,王云龙. 2008. 盘锦芦苇湿地空气动力学参数动态及其影响因子. 应用生态学报,19(3):481~486
- 杨晓玲,郭金耀. 2008. 条斑紫菜对高浓度氮、磷的耐受性研究. 水产科学,27(12):655~657
- 张寒野,何培民,陈婵飞,戴韵管,石 斌,施敏健. 2005. 条斑紫菜养殖对海区中无机氮浓度影响. 环境科学与技术,28(4):44~45
- 郑杰民. 2009. 应用龙须菜降低厦门海域海水中氮、磷的初步研究. 福建水产,4:39~43
- 林 星. 2002. 龙须菜筏式养殖技术. 科学养鱼,8:18
- 国家环境保护局. 1989.《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(GB/T 11894-1989). 北京:中国环境科学出版社
- 国家环境保护局. 1989.《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB/T 11893-1989). 北京:中国环境科学出版社
- 赵先庭,刘云凌,张继辉,曲克明,马德林. 2007. 龙须菜处理海水养殖废水的初步研究. 海洋水产研究,28(2):23~27
- 崔保山,刘兴土. 2001. 湿地生态系统设计的一些基本问题探讨. 应用生态学报,12(1):145~150
- 童冠文. 2010. 条斑紫菜经济性状研究进展. 现代农业科技,11:343~345