

桑沟湾多元养殖生态模型研究： Ⅲ 海带养殖容量的数值研究

史洁^{1,2} 魏皓^{2,3} 赵亮² 方建光⁴ 张继红⁴

(¹中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

(²中国海洋大学物理海洋实验室, 青岛 266100)

(³天津科技大学海洋科学与工程学院, 300222)

(⁴农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要 基于已建立的桑沟湾多元养殖生态模型, 模拟得到桑沟湾海带的生长情况和最终的产量分布。并且运用数值实验的方法, 通过改变海带养殖密度, 探寻桑沟湾海带的养殖容量。结果表明, 养殖密度越大, 对海水流动的阻碍作用越强, 海带生长期间由外海补充到湾内的无机氮营养盐就越少。因此, 提高养殖密度, 最终海带产量并非相应增加。由模型实验得到, 0.9 倍于现有养殖密度为最适养殖密度, 对应的最大海带养殖产出为 7.21 万 t 淡干重。

关键词 桑沟湾 海带 养殖密度 模型

中图分类号 P931.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2010)04-0043-10

Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: Ⅲ Numerical study on the kelp culture carrying capacity

SHI Jie^{1,2} WEI Hao^{2,3} ZHAO Liang² FANG Jian-guang⁴ ZHANG Ji-hong⁴

(¹Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(²Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(³College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, 300222)

(⁴Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fishery Resources, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT Based on the multi-species culture ecosystem model in Sanggou Bay, numerical experiments were done by altering the kelp culture density. The aim is to probe the kelp culture carrying capacity in Sanggou Bay. Increase of the kelp culture density at the same time enlarged the frictions caused by the culture activities, which inhibited the supply of dissolved inorganic nitrogen (DIN) from the open sea. As a consequence, there is no definite increase in the kelp production. Model results for different kelp culture densities indicated that the kelp production reached the peak when the culture density was 0.9 fold of the present one.

KEY WORDS Sanggou Bay Kelp Culture density Model

国家基础研究规划重点项目(2006CB4006)和国家重点基金(40830854)共同资助

收稿日期:2009-08-26;接受日期:2009-12-17

作者简介:史洁(1982-),女,博士,主要从事浅海动力学研究。E-mail: shijie@ouc.edu.cn, Tel: (0532)66786568

容纳量的概念是指一个特定种群,在一个时期内,在特定的环境条件下,生态系统所支持的种群有限大小(PICES 1996)。容纳量直接与环境有关,包括它的空间、食物以及生物理化因子等。由于环境的不稳定性,实际中容纳量并非是一个常数,它是随环境而发生变化的,具有明显的动态特性。通常所说的容纳量是指一个时期内、特定条件下、相对稳定的容纳量(唐启升 1996)。

根据上述容纳量的概念和内涵,本文所探讨的桑沟湾海带的养殖容量是指在一定的环境条件下,在一个海带养殖周期内,最适养殖密度和可获得的最大海带养殖产出。其中,一定的环境条件是指固定温度年循环、太阳辐射年循环、贝类排泄释放、底沉积物释放和施肥情况等物理、生物和化学环境条件,通过改变养殖密度,探寻海带的养殖容量,即最适养殖密度和最大海带养殖产出。

在半封闭养殖海域,为了获得海带的高产,提高海带的养殖密度是一条途径,但是并非养殖密度越大,产出就越大。调查表明,进入20世纪90年代以来,桑沟湾的一些养殖区域,特别是湾内近岸区域养殖的海带在4月中旬或下旬便开始从藻体顶部腐烂,到6月中旬以后,有些区域的海带便腐烂的只剩下1m,严重影响了海带的质量和产量(方建光等 1996a)。而发生这种现象的原因主要是营养盐特别是无机氮营养盐的不足(FAO 1989)。湾内各生物和化学过程以及外海的补充是无机氮营养盐的源,而当贝类排泄释放、底沉积溶出的无机氮固定时,外海的无机氮补充成为控制海带生长的主要因子,外海对桑沟湾的无机氮补充非常重要,占了整个无机氮源项的40.2%(史洁等 2010b)。在与外海水进行交换的过程中,桑沟湾并不是被动的接受外海水对营养盐的补充。由2006年4月和7月对桑沟湾潮流特性的观测,可以看出海带的养殖阻碍了海水的流动,造成了桑沟湾特有的潮流垂直特征(樊星等 2009)。对桑沟湾水动力场进行模拟时,为了得到真实的流场,在POM模型中引入的两种养殖阻力——海面养殖设施阻力和水体中海带阻力(史洁等 2009)。海带养殖密度越大,这两个养殖阻力就越大,阻碍了桑沟湾与外海之间的水交换,也即限制了外海对桑沟湾无机氮营养盐的补充,无机氮供应不足就会影响海带的质量和产量。所以,高养殖密度并不意味着高养殖产出,二者之间通过水动力场和营养盐的补充相联系和制约。最适养殖密度,是考虑了养殖活动本身对水交换和营养盐补充影响下,能带来最大养殖产出的养殖密度。

作者应用已建立的桑沟湾多元养殖生态模型(史洁等 2010a),模拟得到了现有养殖密度下(STANDARD)海带生长情况和最终产量的分布。并且,固定物理强迫和生物化学源汇项(同现有养殖密度 STANDARD)的情况,模拟不同养殖密度下桑沟湾水动力场、无机氮营养盐收支和海带养殖产量的变化,初步探讨海带的养殖容量。

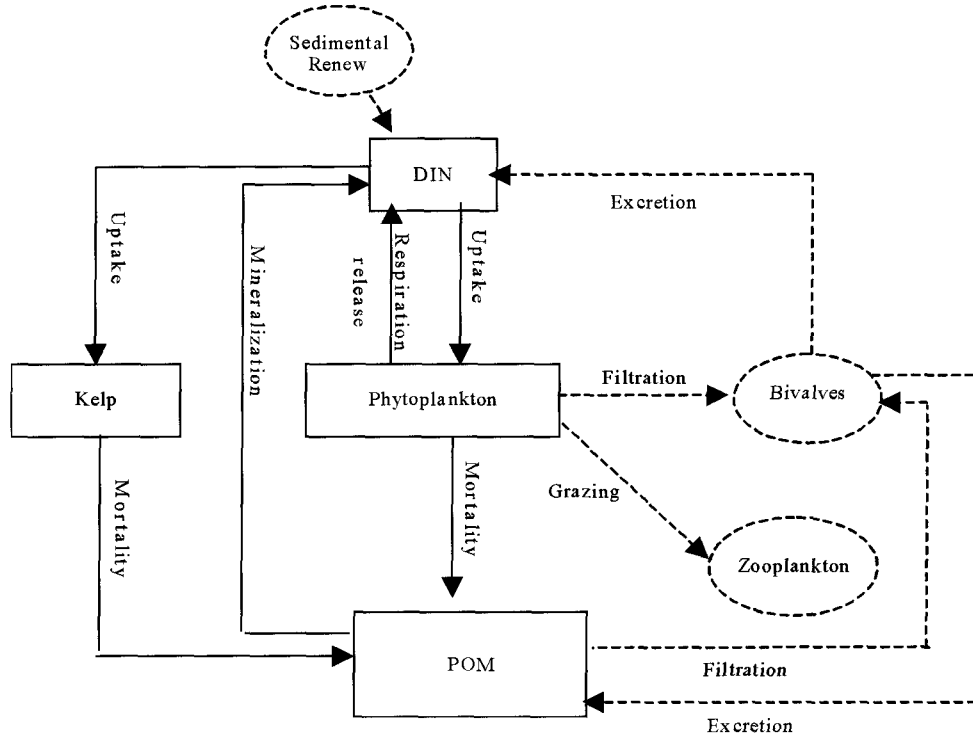
1 模型简介

作者已建立水动力和养殖生态模型耦合的桑沟湾多元养殖模型(史洁等 2010a)。模型水动力部分是在被广泛应用于陆架海的水动力模型POM(Princeton Ocean Model)的基础上,加入了养殖活动的影响,对海表养殖设施和水体中海带的阻力分别进行参数化,模拟得到桑沟湾作为典型养殖海域真实的流场(史洁等 2009)。多元养殖模型的生态部分包含4个状态变量:海带、浮游植物、无机氮营养盐和悬浮有机颗粒物。概念模型如图1所示(史洁等 2010a)。

模型运行1年后的结果作为最终模式的初始场,继续运行1年的结果得到实际养殖密度下海带的生长情况和最终产量。通过改变模式中控制海带养殖密度的参数来得到不同养殖密度下的海带生长及产量情况,探讨最优养殖密度,即养殖容量。

2 现有养殖密度下的模拟结果

海带是桑沟湾主要的养殖品种。本文将海带生长模型耦合到桑沟湾水动力-生态模型中,每年11月1日在海带养殖区播苗,次年5月31日收获。海带生长主要受温度和营养盐共同控制(可通过调节架子的高度来克服光限制)。图2为海带生长期内温度和营养盐限制因子的变化曲线。可见,在海带的生长期内,水温的变化范围为3.9~14.3℃,比较适合海带生长,限制较弱;营养盐对海带生长的限制变化较大,与海带养殖区营养盐浓度变化一致。从11月到次年1月,由海带生物量的变化曲线(图3实线)可以看出,海带生物量增长速度



注:方实框内为模型变量,椭圆虚框作为强迫项考虑

Note: Variables in the model are in the solid-lined rectangles, and the forcing data are in the dashed ellipses.

图 1 桑沟湾养殖生态概念模型

Fig. 1 Schematic diagram of the multi-species culture ecosystem model in Sanggou Bay

(图 3 虚线)较小,海带产量增加缓慢。这时由于海带生物量较小,生物量增加较缓慢,对营养盐的消耗不大,加之此期间浮游植物因受水温和光照限制而生长缓慢,海区内营养水平较高,营养盐对海带生长的限制较小,限制因子维持在 0.85 左右。1 月底到 3 月初,海带产量曲线斜率显著增大,这是由于前期生物量的积累,海带生长加快,大量消耗水体中的营养盐。从 3 月开始,随着温度和光照对浮游植物生长限制的减弱,浮游植物生长同海带一起吸收大量营养盐,使得营养盐水平很快降低,营养盐对海带生长的限制加强,限制因子由 0.8 降至 0.55 左右,由图 2 也可以看出海带产量增加减缓。到 5 月底,最终收获海带 7.01 万 t 干重。而文献报道桑沟湾海带年产量为 8 万 t 干重(方建光等 1996a),本文模拟结果小于实际产量,是由于实际海带养殖中,海带养殖区已扩展到湾外 20m 水深水域。在此区域,海水流动更为畅通、营养盐更丰富、更有利于海带生长,而这正

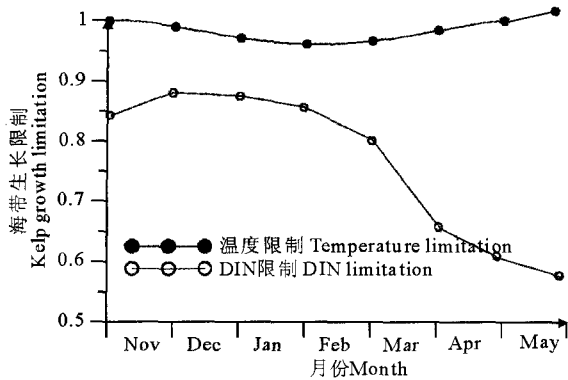


图 2 海带生长的限制因子变化

Fig. 2 Variations of limiting factors for kelp growth

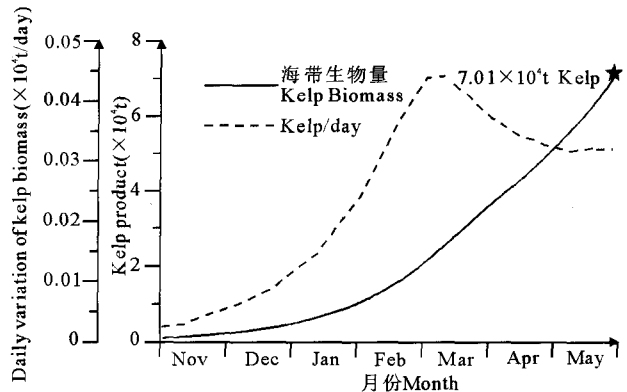


图 3 海带生物量及生长速度变化曲线

Fig. 3 Variations of kelp biomass and growth rate

是模拟所未能覆盖的区域,模拟得到的海带产量也小于实际产量。以下讨论海带养殖容纳量时,所涉及的海带产量均为模式计算得出的湾内的海带产量,不包括湾口以外养殖区。

图 4 为桑沟湾海带最终产量的分布图,即 5 月 31 日海带生物量的分布。整个海带养殖区内,海带的产量并不是均匀的,其分布规律为从湾口到湾顶的方向逐渐减小。湾口附近区域海带产量可达 2 248 g/m²,海带-贝类混养区几乎都小于 700 g/m²,而靠近湾顶的养殖区域的海带产量最小,仅为 271 g/m²。产生此分布的原因是供给海带生长的营养盐的一个重要来源是外海的输入,尤其是在海带养殖的后期,由于海带生长的大量消耗,加上浮游植物生长的吸收,桑沟湾内营养盐水平很低,此时外海营养盐的输送显得尤为重要。由于从湾口到湾顶,养殖生物的重重阻碍,使得湾口处和湾外流速大于湾内,位于湾口处的海带养殖区,海流畅通,海水交换周期短,能够及时补充海带生长所需的无机氮营养盐,产量明显高于湾内。

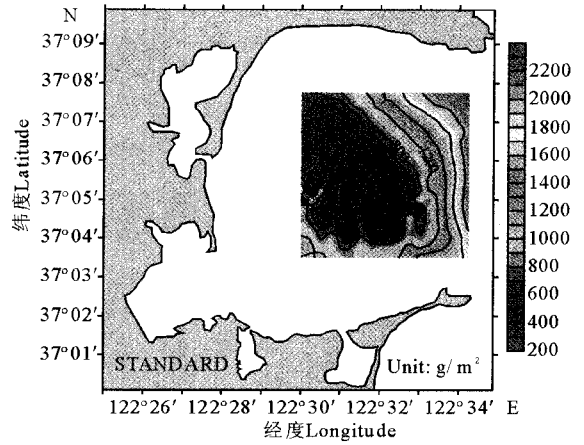


图 4 桑沟湾海带产量分布

Fig. 4 Distribution of the kelp production

3 养殖容量实验描述

本文包括 5 个数值实验:DENSITY-0.8、DENSITY-0.9、DENSITY-1.1、DENSITY-1.2 和 DENSITY-1.5,分别表示现有养殖密度的 0.8、0.9、1.1、1.2 和 1.5 倍的情况。养殖密度不同,水动力模型中海带的初始场和两种阻力会发生相应的变化(表 1)。作者提出了对海表和水体内部两种养殖阻力的参数化方法(史 洁等 2009),水体中海带生长带来的阻力是根据 Jackson 等(1983)提出的阻力公式,与海带的养殖密度成正比。海表养殖阻力是用实测流速资料根据壁面率计算得到,本文将此表面阻力类比与水体中阻力,令其也与养殖密度成正比。

表 1 不同养殖密度下海带初值和养殖阻力系数取值

Table 1 Initial conditions of kelp and culture drag coefficients at different kelp culture densities

实验名称 Experiment	海带初值(g/m ²) Initial kelp density	海表养殖阻力 C _{ds} Surface culture drag	水体中养殖阻力 C _D In-water culture drag
STANDARD	14.4	0.07	0.025
DENSITY-0.8	14.4×0.8	0.07×0.8	0.025×0.8
DENSITY-0.9	14.4×0.9	0.07×0.9	0.025×0.9
DENSITY-1.1	14.4×1.1	0.07×1.1	0.025×1.1
DENSITY-1.2	14.4×1.2	0.07×1.2	0.025×1.2
DENSITY-1.5	14.4×1.5	0.07×1.5	0.025×1.5

4 实验结果与分析

4.1 不同养殖密度下水动力场的变化

不同养殖密度下(DENSITY-0.8 和 DENSITY-1.5),施加不同的养殖阻力,对水动力场进行模拟。结果表明,不同养殖密度下,涨落潮基本规律等流场的基本性质没有改变。但是由于养殖密度越大,阻力就越大,不同养殖密度下流速的大小发生了较大的增减。表 2 给出了海带生长达到其最大长度时,不同养殖密度下海带

表 2 各种养殖密度下流速变化情况

Table 2 Variations of current at different kelp culture densities

实验名称 Experiment	海带养殖区 平均流速(cm/s) Average current velocity	与 STANDARD 比变化率(%) Variation compared with STANDARD	实验名称 Experiment	海带养殖区 平均流速(cm/s) Average current velocity	与 STANDARD 比变化率(%) Variation compared with STANDARD
STANDARD	10.80	/	DENSITY-1.1	10.26	-5.0
DENSITY-0.8	12.13	+12.3	DENSITY-1.2	9.78	-9.5
DENSITY-0.9	11.42	+5.8	DENSITY-1.5	8.61	-20.3

养殖区涨潮平均流速大小及较 STANDARD 增减百分数。现有养殖密度下,涨潮时海带养殖区的平均流速为 10.80cm/s;养殖密度增大为 1.1、1.2 和 1.5 倍时,平均流速分别减小 5.0%、9.5% 和 20.3%;密度减小为 0.9 和 0.8 倍时,平均流速分别增大 5.8% 和 12.3%。

4.2 不同养殖密度下营养盐收支的变化

改变海带养殖密度,海水流动速度发生变化,桑沟湾内海水与外海的交换能力就会随之发生改变,必然会影响海带养殖期间外海对桑沟湾无机氮的补充。实验 DENSITY-0.8 和 DENSITY-1.5 中,海带生长期无机氮营养盐的收支情况如图 5 所示。海带养殖密度从现有养殖密度的 0.8 倍增大到 1.5 倍,海水流动速度逐渐减慢,海带养殖期间外海对湾内无机氮的补充量也从 721.7 t 减小到 397.9 t。养殖密度为现有养殖密度的 0.8、0.9、1.1、1.2、1.5 倍时,整个海带养殖期内,外海对桑沟湾的无机氮补充量分别为现有养殖密度下外海对湾内无机氮补充量的 1.23、1.12、0.94、0.87、0.68 倍。浮游植物对无机氮营养盐的净吸收变化与外海水对营养盐补充量的变化一致,随着海带养殖密度的增大而减小。海带对无机氮的净吸收变化比较复杂,与外海补充量的变化并不完全一致。

4.3 不同养殖密度下海带产量的变化

为了提高桑沟湾海带的产量,增大养殖密度是一个重要的途径。但是,模拟结果表明海带养殖密度与产量的变化并不完全一致。

图 6 给出了各种养殖密度下海带生物量的变化曲线,可以看出从 11 月海带播苗到 3 月初(图 6 左),海带生物量的大小取决于初始的养殖密度。养殖密度为现有养殖密度的 0.8、0.9、1.1、1.2、1.5 倍时,3 月 1 日的海带生物量分别为

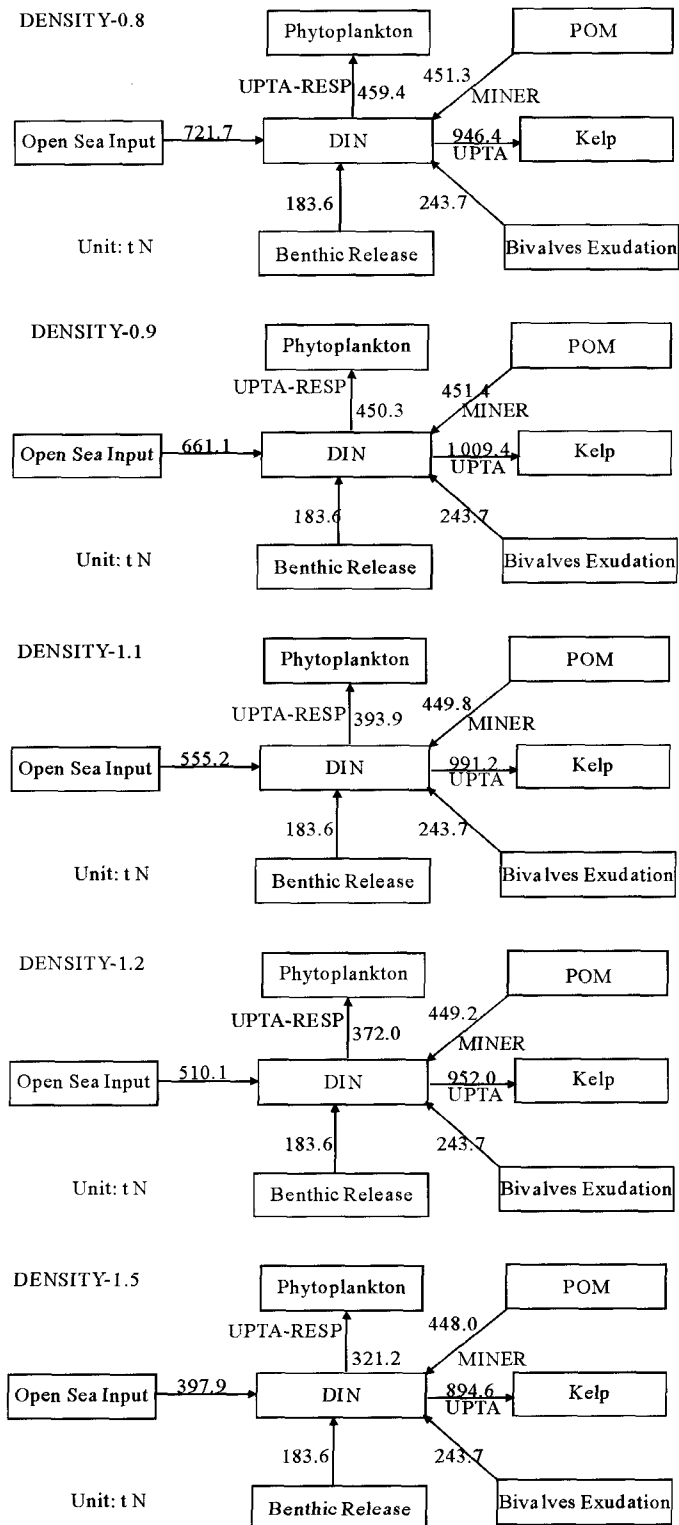


图 5 各种养殖密度实验中海带生长期内 (11月1日~5月31日)

各个过程对营养盐收支的贡献

Fig. 5 Nutrient budgets during the kelp culture period (from Nov. 1st to the next May 31st) at different kelp culture densities

1.67、1.93、2.12、2.26、2.46 万 t 干重,为现有养殖密度下同期海带生物量的 0.81、0.95、1.04、1.11、1.21 倍。由于在此期间桑沟湾内无机氮营养盐充足,可以满足海带生长所需,因此,养殖密度越大,海带生物量就越大。

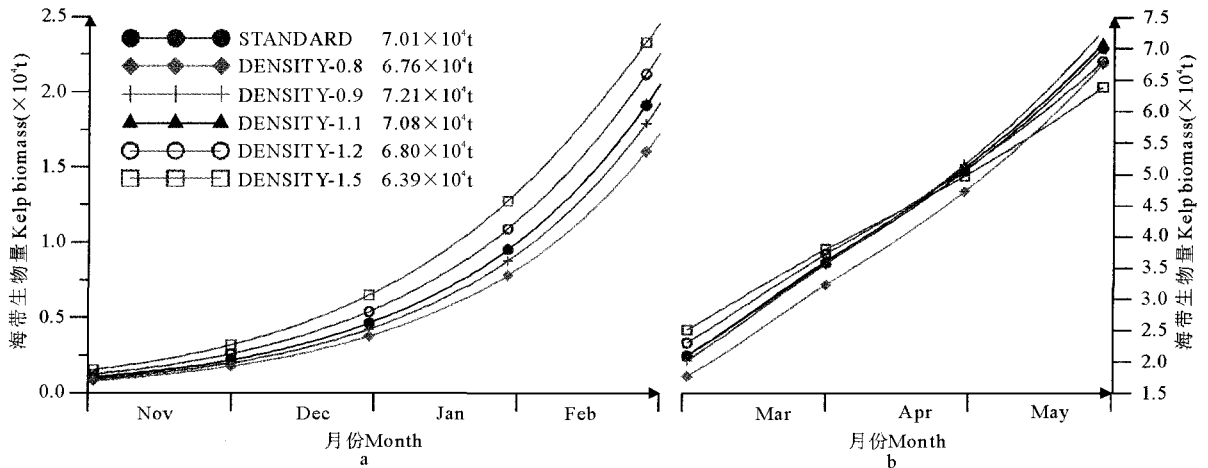


图6 不同养殖密度下海带生物量的变化曲线

Fig. 6 Variations of kelp biomass at different kelp culture densities

3月份开始(图6-B),由于海带生物量较大,对无机氮的大量吸收使之相对缺乏。经过11月~次年3月的生长,海带养殖密度大的海带生物量就越大,对无机氮的需求也越大,氮限制越发明显。此时桑沟湾内营养盐主要依赖于外海的补充,而养殖密度越大,对海水流动的阻碍作用就越强,湾外无机氮营养盐难以补充到湾内供海带生长所需,就出现了养殖密度大的情况下海带生物量增长明显缓于养殖密度小的情况。3月1日~5月31日期间,养殖密度为现有养殖密度的0.8、0.9、1.1、1.2、1.5倍下,海带生物量增加量分别为4.59、5.28、4.96、4.54、3.93万t干重,而STANDARD在此段时间增加量为4.97万t干重,说明海带生长后期无机氮的限制使得海带生物量的增加幅度不能由养殖密度的大小决定。

最终海带产量并不取决于初始的养殖密度。现有养殖密度下(STANDARD)的海带总产量为7.01万t干重;DENSITY-0.8的产量为6.76万t干重,减产0.25万t;DENSITY-0.9的产量为7.21万t干重,增产0.2万t,为所有养殖密度下产量最高;DENSITY-1.1的产量为7.08万t干重,增产0.07万t,与现有养殖密度的产量相差很小,但其产量/播苗值与STANDARD相比减小,因此效益是下降的;DENSITY-1.2和DENSITY-1.5的产量分别为6.80和6.39万t干重,均小于STANDARD的产量,分别减产0.21、0.62万t。其中养殖密度为现有养殖密度的1.5倍时,海带产量最低,可见虽然提高了海带的养殖密度,产量反而大幅度下降。

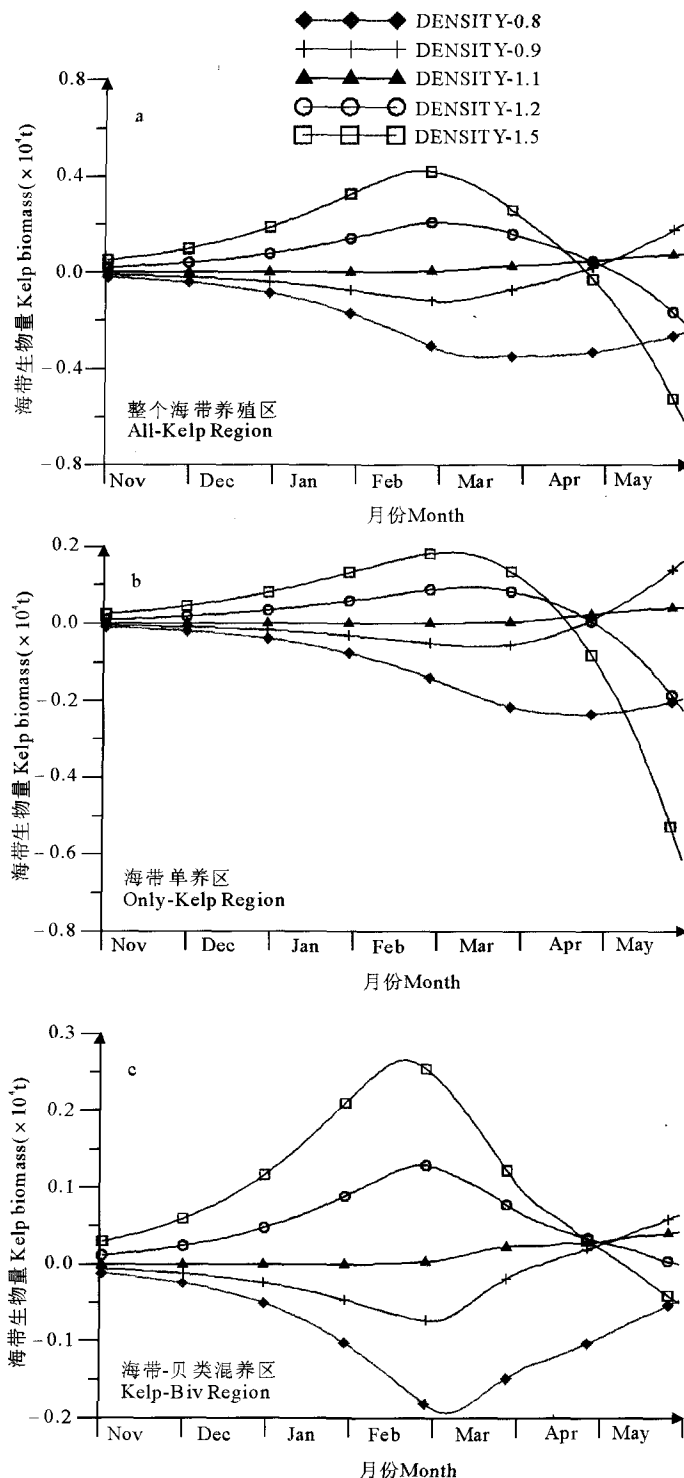
图7a为整个海带养殖区与同期STANDARD海带生物量的差值的变化曲线。养殖密度大于现有养殖密度的情况下(DENSITY-1.2, DENSITY-1.5),11月到次年3月初,差值为正且逐渐增大,说明海带生物量和增长速度均大于STANDARD;3月到海带收获时,差值逐渐减小,实验DENSITY-1.2和DENSITY-1.5中,差值从4月底开始为负值且绝对值逐渐变大,说明由于养殖密度过大,限制了无机氮补充,海带生长速度减小,到最终收获时的产量小于STANDARD。其中DENSITY-1.5尤为典型,与STANDARD相比,最大能大于STANDARD同期海带生物量0.4万t以上,但后期生长速度受到营养盐缺乏的严重影响,最终产量却比STANDARD低0.62万t。养殖密度为现有养殖密度的0.9倍(DENSITY-0.9)时,情况与DENSITY-1.2和DENSITY-1.5相反,11月~次年4月差值为负,说明海带生物量小于STANDARD,之后由于较小的阻力带来较多的营养盐补充,差值变为正,即海带生物量超过STANDARD,最终产量为所有养殖密度中最大。实验DENSITY-0.8中,虽然3月开始与STANDARD的差值变小,说明其增长速度已超过STANDARD,但最终因为初始养殖密度较小而产量小于现有养殖密度,图7表现为差值一直为负值。

比较各种养殖密度下不同区域海带生物量与同期 STANDARD 的差值的变化情况(图 7),可以看出,整个海带养殖区的变化情况与靠近湾口的海带单养区一致,说明增减养殖密度所引起的水动力场变化,以及由此带来的外海无机氮的补充的不同主要在海带单养区体现。

不同养殖密度下,最终海带产量的大面分布(图 8)格局基本类似,从湾口到湾顶,产量逐渐减小,这主要取决于与外海的水交换能力的分布。所有实验中,海带-贝类混养区的产量无论是量值,还是分布格局变化都不大;而位于湾口的海带单养区,由于初始养殖密度和无机氮供应决定的生长情况共同制约了最终的产量,产量变化较大。DENSITY-0.9 中海带单养区的最大产量密度为 $2\ 272\text{g}/\text{m}^2$,为所有实验中最大;而 DENSITY-1.5 中最大产量密度为所有实验中最小,为 $2\ 217\text{g}/\text{m}^2$ 。由不同养殖密度下海带增减产分数分布(图 8),也可以看出改变养殖密度,受影响最大的是海带单养区。养殖密度小于现有养殖密度时(DENSITY-0.9 和 DENSITY-0.8),靠近湾口区域都有不同程度的增产,图 8 表现为几乎都为正值。其中 DENSITY-0.9 的增产范围和量值要大于 DENSITY-0.8。相反,当养殖密度大于现有养殖密度时(DENSITY-1.2, DENSITY-1.5),靠近湾口的区域为负值。其中, DENSITY-1.5 的减产范围和量值都大于 DENSITY-1.2。

5 结论与展望

外海的补充对于桑沟湾的海带生长来说,是一个重要的源。养殖活动本身会通过阻碍海水流动而影响外海对桑沟湾无机氮营养盐的补充。在这种情况下,提高海带养殖密度,就会因为加大了对海水流动的阻碍和限制了营养盐的补



注: a 为整个海带养殖区; b 为海带单养区; c 为海带-贝类混养区

Note: a: Only kelp culture region; b: Kelp region; c: Kelp and bivalves mixed region

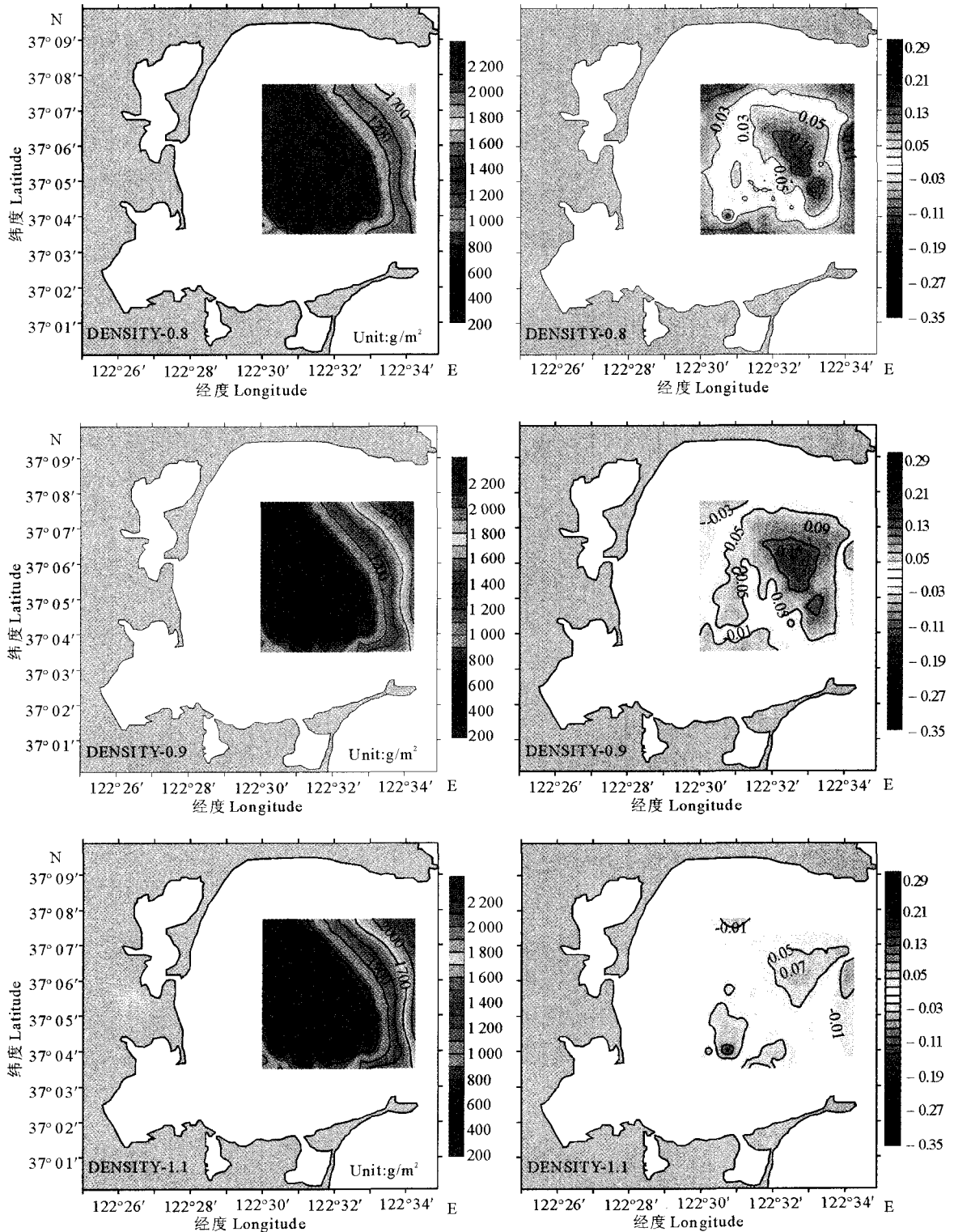
图 7 不同密度下各养殖区与 STANDARD 差值的变化曲线

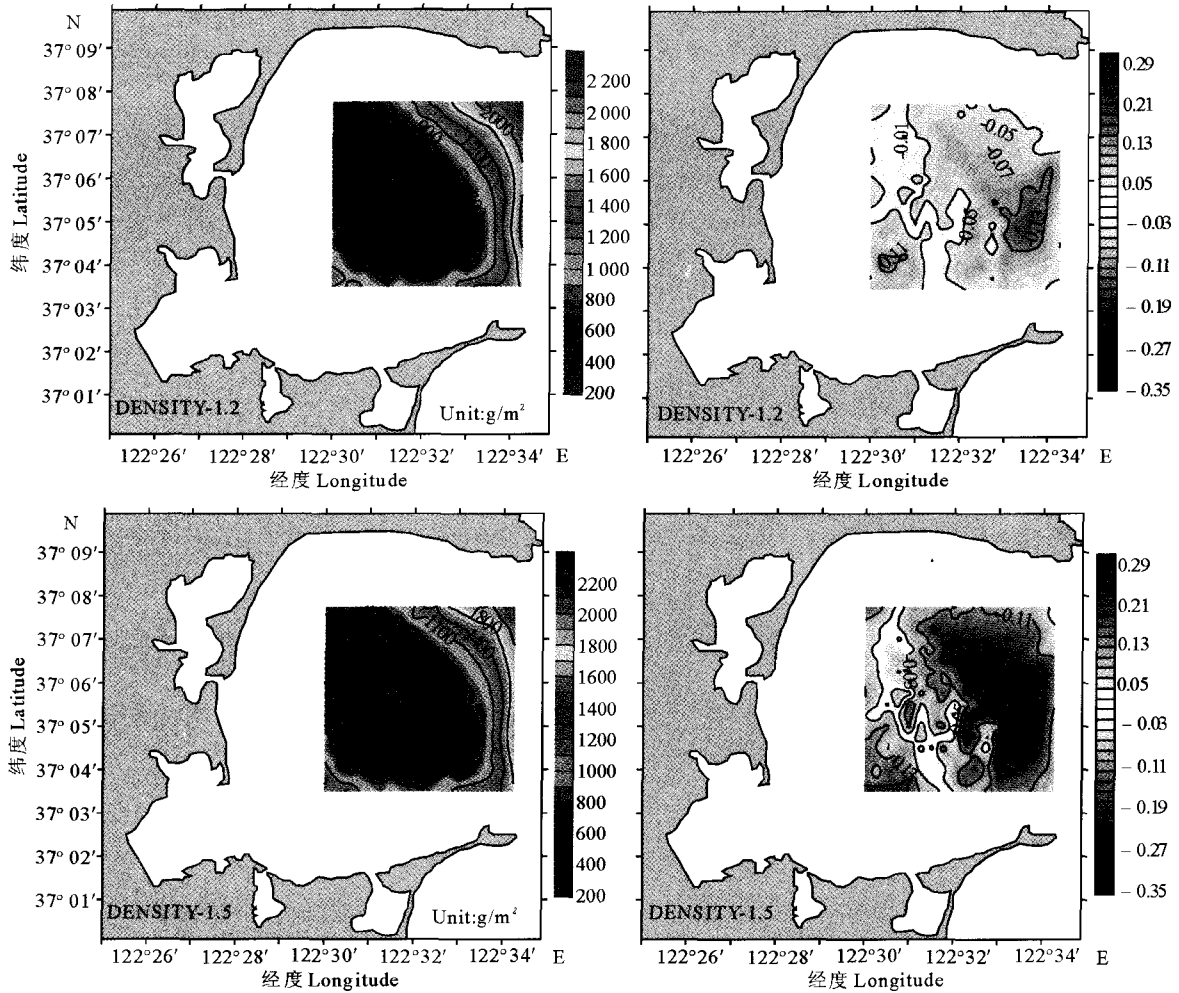
Fig. 7 Difference between kelp biomass at different densities and the STANDARD situation

充,使得最终的产量不一定得到相应的增加。本文应用桑沟湾多元养殖生态模型,将水动力-生态-养殖过程耦合起来,模拟了不同养殖密度下的海水流动、无机氮营养盐补充及海带最终产量的变化(表 3)。

养殖密度从现有养殖密度的0.8倍增加到1.5倍,海带养殖区的平均流速从12.13cm/s减小到8.61 cm/s,外海对无机氮的补充也相应减少,从721.74 t减小到397.91 t。海带产量由于同时受到养殖密度和无机氮营养盐补充的控制,而二者又相互制约,故产量变化比较复杂。

当养殖密度提高到现有养殖密度的1.5倍时,海带的产量为6.39万t干重,比现有养殖密度下减少0.62万t;当养殖密度减小到现有养殖密度的0.8倍时,虽然外海的营养盐供应充足,但最终产量仅为6.76万t干





注:左图为产量分布;右图为增减分数分布

Note: Left diagrams, kelp production; Right diagrams, difference fraction

图 8 不同养殖密度下海带最终产量和增减产分数分布

Fig. 8 Distributions of kelp production and difference fraction at different kelp culture densities

表 3 不同养殖密度下海水流动、外海营养盐补充及海带产量情况

Table 3 Currents, nutrient from the open sea and kelp production at different kelp culture densities

实验名称 Experiment	海带养殖区流速		外海 DIN 补充		海带产量	
	Current velocity in kelp culture area		DIN supply from the open sea		Kelp production	
	量值 (cm/s)	变化	量值 (t N)	变化	量值 ($\times 10^4$ t)	变化量 ($\times 10^4$ t)
	Value	Variation (%)	Value	Variation (%)	Value	Variation amount
STANDARD	10.80	/	589.2	/	7.01	/
DENSITY-0.8	12.13	+12.3	721.7	+23	6.76	-0.25
DENSITY-0.9	11.42	+5.8	661.1	+12	7.21	+0.20
DENSITY-1.1	10.26	-5.0	555.2	-6	7.08	+0.07
DENSITY-1.2	9.78	-9.5	510.1	-13	6.80	-0.21
DENSITY-1.5	8.61	-20.3	397.9	-32	6.39	-0.62

重,比现有养殖密度下减少 0.25 万 t。当养殖密度为现有养殖密度的 1.1、0.9 倍时,最终产量都大于现有养殖密度下的产量,分别增加 0.07、0.20 万 t。

模型结果表明,所有实验中,养殖密度为现有养殖密度的0.9倍时,获得最高的养殖产出7.21万t干重,说明此时为养殖密度和外海营养盐补充最好结合。因此,桑沟湾海带养殖模型得出,在此环境条件下,最适养殖密度为现有养殖密度的0.9倍,最大养殖产出为7.21万t干重海带。

本文是基于桑沟湾多元养殖生态模型,利用数值实验的方法,初步探讨海带的养殖容纳量。对于另一主要养殖生物——贝类,现有模型中将此对无机氮营养盐的贡献作为外强迫给出。不仅如此,贝类对浮游植物的滤食还可以缓解浮游植物与海带之间的营养盐竞争。此外,贝类作为桑沟湾主要养殖品种,产量约为12万t(带壳鲜重),经济效益非常高(方建光等 1996b)。所以,改进模型,将贝类作为状态变量独立出来,是今后工作的重要目标。

参 考 文 献

- 方建光,孙慧玲,匡世焕,孙耀,周诗贲,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋. 1996a. 桑沟湾海带养殖容量的研究. 海洋水产研究,17(2):8~17
- 方建光,匡世焕,孙慧玲,孙耀,周诗贲,宋云利,崔毅,赵俊,杨琴芳,李锋. 1996b. 桑沟湾栉孔扇贝养殖容量的研究. 海洋水产研究,17(2):18~30
- 史洁,魏皓. 2009. 半封闭高密度筏式养殖海域水动力场的数值模拟. 中国海洋大学学报,39(6):1181~1187
- 史洁,魏皓,赵亮,方建光,张继红. 2010a. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: I 养殖生态模型的建立和参数敏感性分析. 渔业科学进展,31(4):26~35
- 史洁,魏皓,赵亮,方建光,张继红. 2010b. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: II 生态环境模拟与生源要素循环. 渔业科学进展,31(4):36~42
- 唐启升. 1996. 关于容纳量及其研究. 海洋水产研究,17(2):1~6
- 樊星,魏皓,原野,赵亮. 2009. 近岸典型养殖海区的潮流垂直结构特征. 中国海洋大学学报,39(2):181~186
- FAO. 1989. Culture of kelp *Laminaria japonica* in China. RAS/86/034. Training Manual,140
- PICES. 1996. Report of the PICES-GLOBEC International Program on climate change and carrying capacity: Science Plan and Implementation Plan. PICES Scientific Report,4:1~64
- Jackson, G. A., and Winant, C. D. 1983. Effect of a kelp forest on coastal currents. Continental Shelf Research,2(1):75~80