

桑沟湾海带养殖容量的研究

方建光 孙慧玲 匡世焕 孙耀 周诗赉
宋云利 崔毅 赵俊 杨琴芳 李锋

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

Jon Grant Craig Emersom

(Oceanography Department Dalhousie University, Halifax, B3H 4J1, Canada)

王兴章 汤庭耀

(荣成市水产局, 石岛 264309)

摘要 首次对桑沟湾的海带养殖容量进行了调查研究。采用了无机氮作为估算桑沟湾海带养殖容量的关键因子, 通过无机氮的供需平衡估算海带养殖容量。结果显示, 海底沉积物中释放的无机氮为该湾无机氮的主要来源, 而由海水交换所带入的无机氮次之。海带生长期间海水交换周期为 39d, 比 80 年代中期延长了近 1 倍。桑沟湾在海带生长期间由海水交换、陆地径流、动物排泄和海底沉积物中释放所进入该湾的无机氮总供应量为 1228t; 而浮游植物、附着藻类的总无机氮需求量为 582t。能够支持海带生长的无机氮总量为 646t。因此, 桑沟湾海带淡干养殖容量为 54 000t, 单位面积养殖容量为 600kg/1 500m²。

关键词 海带 无机氮 桑沟湾 养殖容量

桑沟湾是我国北方主要海带 (*Laminaria japonica*) 养殖水域, 1994 年湾内、外养殖总水面为 7 500hm², 淡干总产量达 8 万 t, 已成为桑沟湾海水养殖支柱产业之一。但自进入 90 年代以来, 一些养殖区域, 特别是湾内近岸水域养殖的海带在 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得只剩下不足 1m, 严重影响了产品的质量和产量。据文献报道, 发生这种现象的原因主要是水温过高和营养盐特别是氮肥不足^[1]所造成。4~5 月中旬期间, 桑沟湾内的平均水温变化范围为 7~12℃, 属于海带适宜生长温度范围, 由水温过高引起海带发生腐烂的可能性应该排除。因此, 引起海带腐烂的主要原因可能是无机氮缺乏或养殖密度过大所致。

为了海带养殖业的健康稳定发展, 保证产品质量, 高效低耗地进行海水养殖, 在国家

科委和加拿大国际发展研究中心的资助下,在荣成市政府和有关部门的密切配合和大力支持下,我们于1993~1995年期间对桑沟湾的海带养殖容量进行了调查研究。

1 材料和方法

1.1 调查站位设置及调查项目

桑沟湾位于山东半岛东端(37°01'~37°09'N, 122°24'~122°35'E),湾口向东,南北口长达11.5km,东西宽7.5km,湾内总面积约为13 333hm²。平均水深7~8m,最大水深15~17m。该湾潮流类型为不规则半日潮。年平均水温13℃左右,2月份水温最低,为1.8℃;8月份水温最高,为24.9℃。湾内年平均盐度为31.76,1月份最低,为30.993;6月份最高,为32.276^[2]。湾内、外共设置23个采样调查站位(图1)。调查项目包括:NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N、PO₄-P、COD、pH、水温、盐度、叶绿素a、有机悬浮颗粒浓度(POM)和总悬浮颗粒浓度(TPM)等。

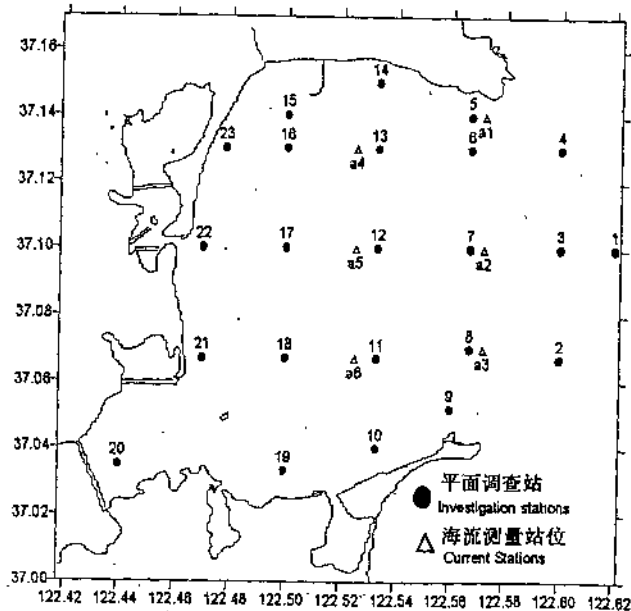


图1 桑沟湾取样及海流测定站位分布图

Fig. 1 Location of sampling and current stations in Sanggou Bay

1.2 水样采集及测定方法

调查船系荣成市渔政3号船, GPS定位,除冬季外,每月调查1次。采水器为颠倒采水器,水深超过8m,水样分底层和表层两个,水深小于8m水域只采表层水样。水样全部在设置于荣成市崖头镇养殖场内的化验室内进行。

水化学分析根据《海洋调查规范》和《海洋污染调查规范》所规定的标准进行测定^[3,4]。

每个调查水层取500ml水样进行叶绿素a测定。水样先用100目筛绢过滤除掉浮游动

物和大型藻类后,用 M-50 过滤瓶和 $0.45\mu\text{m}$ 孔径的醋酸纤维微孔滤膜进行抽滤,叶绿素浓度用 7230 分光光度计测定。抽滤、测定和叶绿素计算方法见 Parsons^[5]。

1.3 海水流速及交换周期的测定

海流测定站位共设置 6 个,3 个位于湾口,3 个位于湾内中部(图 1)。海流计为 SLC9-2 型直读式海流计,分别于 1994 年的 3 月、7 月和 10 月进行了 3 次测定。每次于大潮和小潮期间各连续测定流速、流向 25h。

COD 浓度作为计算海水交换周期的指示物。每次分别计算大、小潮期间的海水交换周期,然后大、小潮交换周期的平均值为测定季节的海水交换周期。

1.4 初级生产力的测定

湾内共设置 7 个站位进行初级生产力的测定。测定方法为叶绿素 a 法,用 C^{14} 法测出同化系数后,根据叶绿素浓度计算出不同季节初级生产力和初级生产量。水域初级生产量计算根据 Cadee 和 Hegeman 提出的简化计算公式^[6]。

1.5 不同养殖时期海带及附着藻类含氮量 N_A 的测定

从 11 月开始,从湾内、外不同养殖水域采集海带及附着藻类样品,先晒干后放入烘箱内,在 60°C 下连续烘干 48h,然后送到国家水产品检测中心用 Tector 1030 测氮仪和 K 氏定氮法进行含氮量测定。

1.6 桑沟湾无机氮的补充、消耗及估算公式

桑沟湾的无机氮主要来源与利用如图 2 所示。由于桑沟湾周围河流干枯,因此,在本项目研究中陆地径流只计算由沽河口流入的城市污水中所携带的无机氮。

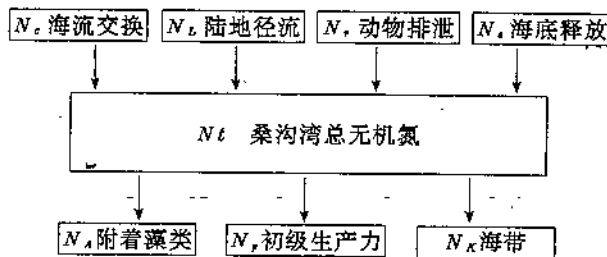


图 2 桑沟湾无机氮补充消耗示意图

Fig. 2 Sketch map of supplies and demand of inorganic nitrogen in Sanggou Bay

其计算公式分别为:

$$N_c = \sum_{i=1}^n C_{Ni} \times S \times D \times \frac{T_i}{t} \times 10^{-9} \quad (1)$$

$$N_s = \sum_{i=1}^n C_{Si} \times T_i \times S \times 10^{-9} \quad (2)$$

$$N_L = \sum_{i=1}^n C_{Li} \times Q_i \times T_i \times 10^{-9} \quad (3)$$

$$N_p = K_0 \sum_{i=1}^n P_i \times S \times T_i \times 10^{-9} \quad (4)$$

$$N_A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_j (W_j - W_0) \times S \times 10^{-9} \quad (5)$$

$$N_K = N_C + N_S + N_L - N_p - N_A \quad (6)$$

$$P_T = \frac{N_K}{K_1} \quad (7)$$

式中: N_C 为海带养殖期间海水交换带入湾内的无机氮(t); N_S 为海带养殖期间海底沉淀中释放的无机氮(t); N_L 为海带养殖期间陆地径流带入的无机氮(t); N_p 为海带养殖期间湾内初级生产力所需的无机氮(t); N_A 为海带养殖期间其他大型藻类生长所需无机氮(t); N_K 为可供海带生长的总无机氮(t); P_T 为淡干海带养殖容量; C_{Ni} 为海带生长期间某一阶段湾口调查站位的平均无机氮浓度(mg/m³); C_B 为海底沉积物中无机氮释放速率(mg/m²/d); C_{Pi} 为陆地径流中无机氮浓度(mg/m³); Q_i 为陆地径流量(m³/d); S 为养殖面积(m²); D 为湾内平均水深(m); T_i 为取样间隔(d); t 为湾内海带养殖生长期间海水完全交换1次所需时间(d); P_i 为不同时间湾内浮游植物初级生产量(mg C/m²/d); W_0 为湾内养殖海带生长时大型附着藻类初始生物量(mg/m²); W_j 为不同大型附着藻类的生物量(mg/m²); K_0 为该湾海水中浮游植物体内 N:C; K_j 为不同品种大型附着藻类含氮量(%); K_1 为5月下旬淡干海带中氮含量(%). m 为附着藻类种类; n 为取样观测次数。

1.6.1 海水交换带入该湾总无机氮(N_C)概算

采用1、2、3、4号站位的 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 三项无机氮总和的平均值作为每次测定期间湾外无机氮进入该湾的无机氮平均浓度,根据每次测定时间间隔和海水交换周期,确定计算在海带生长期间由海水交换带入该湾的无机氮总量。

1.6.2 海底沉积物中氮(N_S)释放量的计算

1994年5月,由潜水员在指定站位利用圆柱型有机玻璃管将海底10cm的柱状海泥样品仔细取样,然后在岸边实验室进行底泥无机、有机总氮、总磷释放模拟试验。测定方法同上。

1.6.3 陆地径流和城市污水中无机氮(N_L)的测定

由于近年来很少有陆地径流进入桑沟湾,海带的生长期为11月~6月又正处于该地区干旱季节,因此,陆地径流所带入该湾的无机氮可以忽略不计。城市污水来源主要由沽河口流入该湾,流入量的计算主要根据荣成市环保局提供的数据。

1.6.4 动物排泄无机氮(N_p)的概算

桑沟湾的主要养殖和附着动物为栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)和贻贝(*Mytilus edule*)。栉孔扇贝的无机氮排泄量是根据李顺志等(1983)的试验数据估算,贻贝的无机氮排泄量则根据 Widdows^[9]给出的相应季节的贻贝氨氮排泄量回归曲线查出。

1.6.5 浮游植物繁殖生长所需无机氮(N_A)的计算

根据初级生产力和叶绿素 a 浓度季节变化,以及该湾浮游植物体内总氮与有机碳含量之比,计算出海带生长期间浮游植物生长繁殖所需的无机氮总量。根据国家海洋局一所的研究结果,该湾浮游植物体内总氮与有机碳含量之比为9.26:1。

2 结果

2.1 桑沟湾海水交换周期

因季节不同,桑沟湾海水交换周期略有变化(表1)。

表1 不同季节桑沟湾海水交换周期的变化

Table 1 The seasonal variation of water exchange periods of Sanggou Bay in 1994

日期 Date	海水交换周期(d) Water exchange periods(d)		
	大潮 Spring tide	小潮 Neap tide	平均 Mean
	1994-03-27	24	
1994-04-03		54	39
1994-07-04	28		
1994-07-11		62	45
1994-10-16		43	
1994-10-27	23		33

由于海带的生长期为11月至翌年5月下旬,因此,在计算该湾海带养殖容量时采用了春季的平均值39d作为海水交换周期。

2.2 海带生长期间总无机氮的供应量

根据公式(1),桑沟湾在海带生长期间由海水交换所带入的无机氮计算结果如表2所示。

表2 1993年11月至1994年5月不同期间桑沟湾海水交换所带入湾内总无机氮量

Table 2 Total inorganic nitrogen carried into the bay by tidal current during kelp culture period

试验期 Period	无机氮平均浓度 C_N concentration of N ($\mu\text{g N/L}$)	面积 S area ($\times 10^4 \text{m}^2$)	平均水深 D mean depth (m)	取样间隔 T time span (d)	海水交换周期 t exchange period (d)	无机氮 N_c subtotal of N (t)
1993-11-01~1993-12-18	148.31	1.33	8	49	39	198.76
1993-12-19~1994-02-22	36.19	1.33	8	66	39	65.32
1994-02-23~1994-04-10	40.29	1.33	8	48	39	52.90
1994-04-11~1994-05-09	37.49	1.33	8	31	39	31.79
1994-05-12~1994-05-31	27.90	1.33	8	37	39	28.23
合计 Total			8	213	39	377.00

根据湾内6个站位的测定数据和公式(2),桑沟湾海底沉积物中无机氮的总释放量如表3所示。

表3 海带生长期间桑沟湾海底沉积物中无机氮释放量

Table 3. Total inorganic nitrogen released from sediment of sea bed during kelp culture period

释放速率 C_N releasing rate (mg/m ² /d)	面积 S area (m ²)	取样间隔 T time span (d)	无机氮总量 N_L total N (t)
19.14	1.33×10^6	213	543.84

桑沟湾的主要污水来源为荣成市城市污水,经沽河口流入桑沟湾,其他污水排放系统分别为小海水系和桑沟河水系。根据王丽霞等人^[7]的调查数据和公式(3)计算结果,污水排放带入桑沟湾的无机氮如表4所示。

表4 海带生长期间城市污水带人桑沟湾的无机氮

Table 4. Total inorganic nitrogen carried by runoff water during the growth period of kelp

平均浓度 C_r mean concentration of N (mg/m ³)	平均流量 Q mean flowing rate (m ³ /d)	取样间隔 T time span (d)	无机氮总量 N_L total N (t)
1.7	20 000	213	7.24

根据李顺志等^[8]的试验结果计算,1个5.5cm的扇贝在海带养殖期内的无机氮排泄量为142mg,桑沟湾的扇贝养殖量为20亿粒,因此,在海带生长期间养殖扇贝的无机氮排泄量为284t。Widdows^[9]对贻贝的研究结果显示,在春季,每个贻贝每24h氨氮平均排泄量约为200 μ g。桑沟湾贻贝的资源量约为2.7亿个,因此,桑沟湾贻贝在海带生产期间的无机氮排泄量约为11t。加上其他动物如海鞘、牡蛎动物的无机氮排泄量,整个桑沟湾养殖和附着动物在海带生长期间的无机氮排泄量约为300t。

综上所述,桑沟湾无机氮总供应量约为 $N_T = N_0 + N_L + N_r + N_s = 1 228t$ 。其中海水交换提供30.7%,沉积物释放提供44.3%,城市污水提供0.6%,动物排泄提供24.4%。

2.3 海带生长期间桑沟湾其他生物对无机氮的需求量

根据公式(4),桑沟湾在海带生长期间不同阶段初级生产量所需无机氮计算结果如表5所示。

表5 海带生长期间湾内浮游植物繁殖生长所需总无机氮

Table 5 Total inorganic nitrogen required by phytoplankton during the growth period of kelp

试验期 period (年 月 日)	叶绿素 a chl a (μ g/L)	同化率 AE* (mg C/mg chl a/d)	面积 area ($\times 10^6 m^2$)	时间 time (d)	阶段有机碳生产量 subtotal of C (t)	转换 系数 k	氮需求量 subtotal of N (t)
1993-11-01~1993-12-18	0.95	4.40	1.33	48	1364.90	9.25	147.56
1993-12-19~1994-02-22	4.13	1.10	1.33	66	1575.30	9.25	170.30
1994-02-23~1994-04-10	5.24	1.19	1.33	48	859.86	9.25	92.96
1994-04-11~1994-05-09	2.14	1.36	1.33	30	250.81	9.25	27.11
1994-05-12~1994-05-31	2.26	2.19	1.33	21	895.77	9.25	96.84
合 计 Σ			213	4 946	64		534.77

*AE为 Assimilation Efficiency

由于季节不同,湾内附着藻类种类组成不同。桑沟湾内海带生长期间的附着藻类组成主要有石莼、萱藻、海带、裙带菜、浒苔、水云、大叶藻等。根据公式(5)和含氮量分析测定结果,桑沟湾海带生长期间附着藻类总无机氮需求量如表6所示。

表6 海带生长期间附着藻类总无机氮需求量

Table 6 Total inorganic nitrogen required by fouling algae in Sanggou Bay during the growth period of kelp

平均生物量 mean biomass(g/m ²)	平均含氮量 K_2 N content (%)	面积 area ($1 \times 10^3 \text{m}^2$)	N_A 总需氮量 total N (t)
12	3	1.33	47.88

海带生长期间桑沟湾浮游植物和附着藻类所需无机氮总量约为583t。

2.4 桑沟湾海带生长期间可供海带生长的总无机氮

根据公式(6),桑沟湾可供海带生长的总无机氮为645t。

2.5 桑沟湾海带养殖容量

表7 桑沟湾海带养殖容量

Table 7 Carrying capacity of Sanggou Bay for kelp *Laminaria japonica*

可利用无机氮 N_K available N for kelp(t)	收获海带中无机氮含量 K_2 content of N in kelp(%)	海带养殖容量 P_K carrying capacity (t)
645	1.2	53 833

根据公式(7),桑沟湾海带淡干总养殖容量估算值为54 000t左右,单位面积容量600kg/1 500m²。

3 讨论

3.1 理论养殖容量与养殖现状评价

养殖容量是诸多生态环境因子与养殖生物相互作用后达到的动态平衡,影响养殖容量有诸多因素,如营养水平、气候、水化学、水文、物理和生物等。如何正确确定估算养殖容量的关键因子,是关系到估算出的养殖容量模式是否能正确反映客观现实的关键。大量研究业已证明,海洋环境中氮比其他营养元素更可能成为初级生产的限制因子^[10]。在本研究中,作者根据桑沟湾无机氮缺乏、氮磷比例严重失调的现状,选择了无机氮作为对该湾养殖容量进行估算的关键因子。同时,该研究是在假设经过海水交换、海底沉积物释放和陆地径流所带入桑沟湾的总无机氮能够全部被海带和其他藻类吸收为前提的。

计算结果显示,桑沟湾海带淡干养殖容量约为54 000t,单位养殖容量为600kg/1500m²。1994年该湾内海带养殖面积约为3 200hm²,养殖产量为2万t左右。与养殖容量相比,湾内实际养殖量低于养殖容量约3万余t,而单位面积实际养殖量则比理论估算值每1 500m²高300kg左右。

理论养殖容量与实际养殖量产生较大差异的主要原因为:(1)目前该湾内的海带养

殖面积约为3 200hm², 仅占桑沟湾总面积的25%左右, 因此理论养殖容量大于实际养殖量。(2)理论容量与实际单位养殖产量相差较大的另一个主要原因是, 本文计算的单位面积容量是基于整个桑沟湾而言。由于海流的作用, 养殖海带可以利用一部分非海带养殖水域的无机氮, 因此, 实际单位面积产量比估算产量略为偏高。(3)分析本文所采用的计算公式便可以看出, 海带养殖容量估算模式是在以无机氮供需平衡理论上, 并且是在假设海带能将所有无机氮全部吸收利用的前提下建立的。湾内无机氮的供应量主要受海水交换周期、海流、水深等环境因子的限制。对整个桑沟湾而言, 其海带养殖容量可达到5万t左右。但由于养殖区域不同, 单位面积养殖容量亦有较大的变化。湾口处和湾口外流速大于湾内, 养殖区海流畅通, 海水交换周期缩短, 能够满足海带生长所需要的无机氮和其他营养盐, 产量明显高于湾内。根据海流测量结果, 从湾口到湾内流速逐渐减小, 因而海带产量则从湾外到湾内呈逐步递减趋势。

由流速不同而引起的养殖容量变化可用以下公式进行估算:

$$\Delta P = \frac{N_0}{k_2 \times s} \times \frac{(v - \bar{v})}{v} \quad (8)$$

式中: ΔP 为在平均单位面积养殖容量基础上增减的淡干海带产量(kg/m²); N_0 为海带生长期由海水交换带入该湾的总无机氮(t); k_2 为5月底海带中无机氮含量(%); s 为桑沟湾总面积(m²); v 为海带养殖水域海流流速(cm/s); \bar{v} 为湾内平均流速。

1994年该湾湾口处的平均流速为24cm/s, 湾内平均流速为10cm/s。根据此公式, 湾口处的海带养殖容量可增加500kg/1 500m², 单位面积总养殖容量为1 100kg/1 500m²。与实际养殖量较为接近。湾中部养殖容量为600kg/1 500m², 湾底部养殖容量为400~500kg/1 500m²左右。目前, 桑沟湾的海带养殖密度不论是湾内湾外基本是使用同一个养殖密度, 即苗绳间距1.5m, 苗绳长5m, 筏绳间距5m, 每养殖400苗绳占水面约为1 500m²。在海带生长前期, 由于无机氮的需求量低于容量, 湾外湾内海带生长均正常。4月中旬以后, 海带正处于快速生长后期, 不但对无机氮的需求量增大, 而且由于藻体增大阻碍了海水的交换速率, 同时附着藻类和浮游植物亦处于快速生长繁殖阶段, 因而导致湾内的无机氮供应量低于维持海带正常生长的需求量, 故发生因缺氮而导致的海带变白腐烂等症状。此时湾外由于海水交换快, 无机氮供应较充足, 海带可以继续生长, 因而达到较高的产量。比较分析湾内湾外海带研制产量产生差异的原因, 说明桑沟湾湾内海带单位面积养殖量已超过理论养殖容量。为了获得高质量的海带产品, 湾内海带单位面积养殖量须根据不同水域的养殖容量相应减少。

通过分析, 1994年3月底至4月初该湾高、低潮期间海流流速、流向以及盐度、COD浓度的变化, 该湾的海水交换周期约为39d, 与80年代中期进行的桑沟湾养殖环境综合调查研究结果相比, 海水交换周期延长了近1倍^[2]。桑沟湾海水交换周期明显延长的主要原因, 是由于80年代中期以来, 海带筏式养殖面积逐年增加, 导致了养殖区域逐年向湾外扩展。到目前为止, 海带养殖已延伸到湾外4km、20m水深以外的区域。如此大量的养殖设施, 如筏绳、浮漂以及海带本身均阻碍了海水的畅通。调查数据显示, 湾口的平均流速为24cm/s, 湾内中部海区的平均流速为10cm/s, 与80年代中期相比, 分别减少了36cm和14cm, 流速的减慢使湾内无机氮补充量减少, 继而导致了湾内养殖海带因无机氮供应不

足而发生腐烂等生态问题。

3.2 养殖容量估算误差

桑沟湾无机氮直接消费者主要由浮游植物、底栖和附着藻类、海带组成。大型底栖藻类的资源量约为2 820t,大叶藻资源量为550t^[2]。大型底栖藻类与大叶藻主要吸收底层或沉积物中的无机氮及其他营养盐,由于该湾海底沉积物中无机氮含量不但大于海水中的浓度而且还向海水中释放,因此,在本研究中没有将底栖藻类和大叶藻吸收的无机氮纳入该湾无机氮收支平衡概算。

通过分析本文中所采用的调查方法和计算公式,主要误差来源有:(1)浮游植物中碳氮比的测定方法。本研究采用碳氢分析仪测定浮游植物体内碳氮比为9.25:1。由于测定时受季节、浮游植物生长状况、海水混浊度的影响,容易产生较大误差。而浮游植物吸收无机氮的数量比较大,因此,碳氮比测定中细微误差的产生,都将对无机氮收支平衡估算产生较大的误差。(2)养殖区域水文海况的变化。表3中数据显示,该湾海底沉积物中释放出的无机氮为540t左右,约占总无机氮供应量的45%,是桑沟湾无机氮主要来源之一。因此,容量估算模式中的估算误差将主要来源于海带生长期间大风和海浪等物理水文因素。在海带生长季节,如果有较多的大风和海浪天气,海水中的无机氮将会大量增加,海带养殖容量也将会大大提高。实践经验同时也证实了这一观点,在海带主要生长季节(11~3月份)发生大风,特别是东北风,频数越多,海带产量、质量越高。相反,如果在这一季节没有较大的风浪,这一年的海带肯定要减产。这是由于桑沟湾较浅,大风推动海浪可以搅动海底沉积物,将沉积物中的无机氮释放到海水中,以满足海带生长需要。若没有较多的风浪天气,海底沉积物中的无机氮释放到海水中的数量就会大幅度减少,因而难以满足海带生长对无机氮的需求。在该研究中,仅根据正常天气情况下海底沉积物中无机氮的释放速率计算海底沉积物中无机氮的释放量,未能将风浪等因子考虑在内。如何将风浪因子对海带养殖容量的影响进行正确估算,将是今后该类研究的重点研究方向之一。

养殖容量的研究,源于70年代末80年代初,Carver^[11]、Crant^[12]等对位于加拿大东海岸的贻贝养殖区进行了养殖容量的估算。Strand等^[13]通过调控池塘中无机氮的浓度等环境因子,计算双壳贝体内氮的增长与消耗和封闭水域养殖系统内氮的流动和转化系数,以达到预测和扩大双壳贝类养殖容量的目的。养殖容量是衡量一个海区养殖潜力的动态指标,主要关键因子的变化均可影响养殖容量的大小。如附着藻类的减少、大风天气的增加、海流的畅通均可使海带养殖容量扩大。此外,对养殖量、生物量、营养盐补充与消耗的计算方法则直接关系到海带养殖容量估算的准确性。关于海带养殖容量的研究,目前国内外尚未见报道。如何使养殖容量估算模式更加简化、全面、实用、准确地应用于实际生产,将有待进一步的研究。