

大鹏澳海水鱼类网箱养殖对水环境的影响

黄洪辉^{1,2}, 林 钦¹, 王文质², 贾晓平¹, 李纯厚¹

(1. 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;

2. 中国科学院热带海洋环境动力学重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301)

摘要:根据 2001~2002 年对大亚湾大鹏澳海水鱼类网箱养殖海域水环境的监测资料,分析讨论了网箱养殖对水环境的影响。结果表明,该海域水环境质量较好,除夏季溶解氧(DO)和春季的硫化物浓度超第二类海水水质标准情况较严重外(超标率均为 62.5%),其他水环境因子一般不超标。养殖区 DO 和叶绿素 a(Chl a)浓度均显著低于对照区(t -test, $P < 0.05$),而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度则一般高于对照区,其他水环境因子的空间分布差异不大。海水 COD_{Mn} 、 BOD_5 和硫化物主要与网箱养鱼生产季节性强的特点有关;而水温、盐度、透明度、悬浮物、DO 和 pH 的季节变化主要受控于大亚湾亚热带季风气候, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 等营养因子的季节变化主要受降雨和浮游植物的影响,Chl a 的季节变化则主要受水温和 N:P 比的影响,与网箱养鱼的关系并不明显。

关键词:网箱养鱼;水环境影响;大鹏澳

中图分类号: S955.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-2227-(2005)03-0009-09

Impact of cage fish farming on water environment in Daya Bay

HUANG Hong-hui^{1,2}, LIN Qing¹, WANG Wen-zhi², JIA Xiao-ping¹, Li Chun-hou¹

(1. Key and Open Lab. of Fishery Ecology & Environment; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. Key Lab. of Tropical Marine Environmental Dynamics, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Water environment monitoring was conducted in the cage fish farm area and its vicinity (as control area) in Dapeng Cove in Daya Bay from 2001 to 2002 on a seasonal basis. The results showed that water quality in the area was in relatively good condition, except the dissolved oxygen (DO) in summer and sulfide in spring both exceeded the criteria of the second class of Sea Water Quality Standards for fisheries in China with exceeding rate of 62.5%, the other water environmental factors were general within the criteria. DO and chlorophyll a (Chl a) in the fish farm were both lower than that in control area significantly (t -test, $P < 0.05$), while the concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$ in the fish farm were general higher than that in control area, and other environmental factors did not display evident differences between fish farm and control area. The seasonal variation of COD_{Mn} , BOD_5 and sulfide mainly related with the seasonal characteristics of fish farming. The seasonal variation of seawater temperature, salinity, transparency, suspended solid, DO and pH were mainly determined by the subtropic monsoons climate in Daya Bay; the seasonal variation of nutrients such as $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DIN , DIP and $\text{SiO}_4\text{-Si}$ were mainly regulated by the rainfall and phytoplankton status, and the seasonal variation of Chl a was mainly related with temperature and N:P ratio, so there were no evident relationship between these factors and cage fish farming.

收稿日期: 2005-05-09

资助项目: 科技部社会公益专项项目(2000DIB50175); 中国水产科学研究院科研项目(2001-4-3, 2003-1-2); 广东省科技计划项目(2002B60114)

作者简介: 黄洪辉(1972-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 从事海洋生态和环境科学研究。E-mail: jxhuanghh@21cn.com

Key words: cage fish farming; water environmental impact; Dapeng Cove

20多年来,海水鱼类网箱养殖在世界各沿海地区得到了迅猛的发展,与此同时,其带来的环境问题也引起了人们的广泛关注^[1-12]。中国有关海水网箱养鱼对海洋环境的影响研究虽也有不少报导^[13-18],但多数只是简单对比养殖区与养殖区外环境因子之间的差异,而较少通过长期连续的监测来研究和评价网箱养鱼对环境的影响^[19]。

大鹏澳是位于广东中部沿海大亚湾西南部的一个半封闭式的浅海小内湾,1985年在大鹏澳东南部海域开始了海水鱼类网箱养殖。目前,该养殖场面积约30 hm²,平均水深约5 m,海水交换条件较差,主要潮流方向为西南-东北方向,流速<10 cm·s⁻¹。该养殖场现在浮桶式养殖鱼排约400组,每组鱼排由9~12个规格为3 m×3 m×3 m的养殖网箱构成。主要养殖品种有鲷科鱼类、鲈鱼、鲳鱼和石斑鱼等,年产量约450 t。本文根据2001年6月至2002年6月对大鹏澳海水鱼类网箱养殖区及其邻近海域进行的周年5个航次的水环境监测资料,分析和研究了水环境因子的时空变化特征及其与网箱养鱼的关系,旨在更深入地了解中国亚热带海域网箱养鱼对水环境的影响。

1 材料与方法

2001年6、9、12月、2002年4和6月,按季度代表月对大鹏澳网箱养殖海域水环境进行监测,共设8个站位,其中5个设在网箱养殖区内,3个设在距养殖场约0.5~0.8 km处,作为对照区(图1)。按《海洋监测规范》^[20]规定的方法,用5 L的有机玻璃采水器采0.5 m深的表层海水,并对水样进行保存和分析,分析的海水理化 and 生物因子包括营养盐(NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N、PO₄-P和SiO₄-Si)、悬浮物、硫化物、化学耗氧量(COD_{Mn})、5日生物化学耗氧量(BOD₅)和叶绿素a(Chl a)。此外,海水水温和盐度(Cole pharmer H-01474-00温度盐度电导计)、透明度(萨氏盘法)、溶解氧(DO)(YSI55型溶氧仪)和pH(Chckeri-H5 pH计)等均在现场测定。

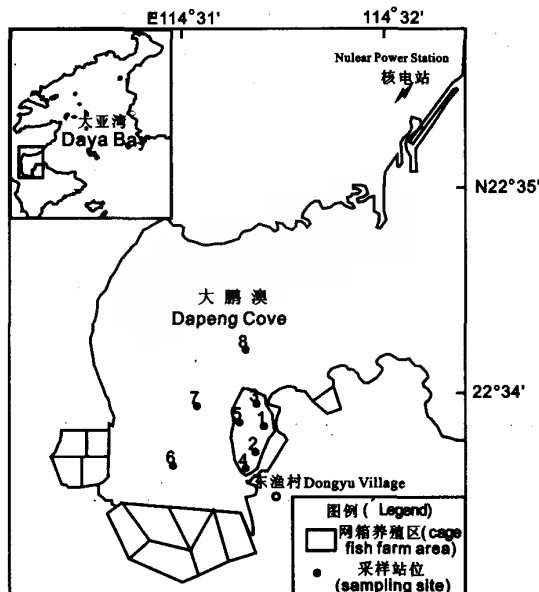


图1 大亚湾大鹏澳海水鱼类网箱养殖场及采样站位图

Fig. 1 Sketch map of the cage fish farm location in Dapeng Cove in Daya Bay and sampling stations

2 结果与讨论

2.1 水温、盐度、透明度和悬浮物

网箱养殖区与对照区海水水温、盐度、透明度和悬浮物等物理因子的监测结果见表1。全海域水温、盐度、透明度和悬浮物浓度的变化范围分别为19.2~30.8℃、21.3~32.4、1.3~5.6 m和0.3~12.3 mg·L⁻¹,只有2001年12月对照区的悬浮物浓度(11.1±1.7mg·L⁻¹)超出了我国第二类适用于渔业水域的《海水水质标准》(<10 mg·L⁻¹)^[21]。从各海水物理因子的空间分布情况看,养殖区和对照区水温(26.1℃)和盐度(29.9和30.0)差异很小,而养殖区的透明度(2.5 m)和悬浮物浓度(3.2 mg·L⁻¹)则均略低于对照区(分别为3.3 m和4.1 mg·L⁻¹),但没有达到显著水平(*t*-test, *P*>0.05)。

养殖区和对照区海水各物理因子的季节变化特征基本相似。夏季的水温最高,冬季最低;盐度则是丰水期(4月至10月)相对较低,冬季的枯水

期最高，其中2001年9月甚至大幅下降至23；透明度则是以秋季最高，冬季悬浮物浓度明显高于其他季节。

物理因子的季节变化主要与大亚湾的亚热带季节气候特点有关。低温干燥的东北季风期从10月开始至次年4月中旬止，风力相对较大，高温湿润的西南季风期则从4月中旬开始持续至9月，风力

相对较小。因此，夏、秋季受雨水和陆地径流冲淡水影响较大，盐度明显较冬、春季低；而在东北季风期，因受风浪较大的影响，易导致沉积物的再悬浮，从而使海水中悬浮物的浓度水平增加，并使海水透明下降。可见水温、盐度、透明度和悬浮物等物理因子的季节变化主要受控于气候因素，与网箱养鱼关系不大。

表1 网箱养殖区和对照区海水温度、盐度、透明度和悬浮物浓度的季节变化

Tab. 1 Seasonal variation of temperature, salinity, transparency and suspend solid in cage fish farm and control area									
时间 time	范围 range	温度/℃ temperature		盐度 salinity		透明度/m transparency		悬浮物/mg·L ⁻¹ suspend solid	
		FA	CA	FA	CA	FA	CA	FA	CA
2001-6	X ± SD	27.9 ~ 28.1	27.9 ~ 28.1	28.9 ~ 30.8	29.7 ~ 31.7	1.3 ~ 1.9	2.0 ~ 2.1	1.4 ~ 3.2	2.8 ~ 3.8
		28.0 ± 0.1	28.0 ± 0.1	30.1 ± 0.7	30.4 ± 1.1	1.6 ± 0.2	2.1 ± 0.1	2.4 ± 0.6	3.2 ± 0.5
2001-9	X ± SD	27.6 ~ 28.3	27.3 ~ 27.8	21.3 ~ 24.2	22.1 ~ 24.5	3.0 ~ 5.0	3.5 ~ 5.5	1.9 ~ 2.6	1.9 ~ 2.8
		27.9 ± 0.3	27.6 ± 0.3	22.8 ± 1.0	23.0 ± 1.3	3.9 ± 0.7	4.6 ± 1.0	2.3 ± 0.3	2.4 ± 0.5
2001-12	X ± SD	19.2 ~ 19.4	19.3 ~ 19.4	32.1 ~ 32.3	32.1 ~ 32.3	2.1 ~ 2.5	1.5 ~ 2.4	5.3 ~ 8.0	9.2 ~ 12.3
		19.3 ± 0.1	19.3 ± 0.1	32.2 ± 0.1	32.2 ± 0.1	2.3 ± 0.1	1.9 ± 0.5	6.2 ± 1.0	11.1 ± 1.7
2002-4	X ± SD	24.8 ~ 24.8	24.8 ~ 24.9	31.8 ~ 32.3	32.0 ~ 32.2	2.0 ~ 3.0	2.1 ~ 4.0	2.6 ~ 4.0	2.0 ~ 4.2
		24.8 ± 0.0	24.8 ± 0.1	32.1 ± 0.2	32.1 ± 0.2	2.4 ± 0.4	3.5 ± 0.5	3.4 ± 0.5	2.9 ± 1.1
2002-6	X ± SD	30.3 ~ 30.8	30.8 ~ 30.8	32.2 ~ 32.4	32.2 ~ 32.2	1.5 ~ 3.2	3.0 ~ 5.6	0.9 ~ 2.1	0.3 ~ 1.6
		30.5 ± 0.2	30.8 ± 0.0	32.3 ± 0.1	32.2 ± 0.0	2.4 ± 0.8	4.4 ± 1.3	1.6 ± 0.5	1.1 ± 0.7
年平均 annual average		26.1	26.1	29.9	30.0	2.5	3.3	3.2	4.1

注：FA 表示网箱养殖区；CA 表示对照区
Note: FA denotes cage fish farm area, CA control area.

2.2 DO、pH、COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物

监测期间养殖区海水 DO 浓度变化范围为 4.01 ~ 8.01 mg·L⁻¹，年平均值为 5.60 mg·L⁻¹，对照区的变化范围为 4.82 ~ 8.35 mg·L⁻¹，年平均值为 6.53 mg·L⁻¹，养殖区的 DO 浓度水平显著低于对照区 (*t*-test, *P* < 0.05)。养殖区和对照区 DO 浓度的季节变化特征相同，冬、春季的浓度水平均相对较高，而夏、秋季则较低 (图 2a)，其中，夏季超第二类海水水质标准 (DO < 5 mg·L⁻¹) 较严重，超标率为 62.5%。这表明该养殖场养殖容量可能过大，养殖环境已经有所老化^[14]。

表2 为 pH、COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物的监测结

果。pH、COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物的空间分布差异不明显 (*t*-test, *P* > 0.05)，养殖区的年平均值分别为 8.12、0.67 mg·L⁻¹、1.19 mg·L⁻¹ 和 29.5 μg·L⁻¹，对照区的分别为 8.15、0.67 mg·L⁻¹、1.44 mg·L⁻¹ 和 33.4 μg·L⁻¹。用我国第二类海水水质标准进行评价，只有 2002 年 4 月养殖区和对照区的海水硫化物均有超标站位出现，超标率达到了 62.5% (>50 μg·L⁻¹)。从季节变化来看，养殖区和对照区的变化特征基本相同，pH 除秋季有较大幅度向下波动外，其他季节较稳定 (图 2b)；而 COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物均以春季最高，其他季节差异不大 (图 2c, d, e)。

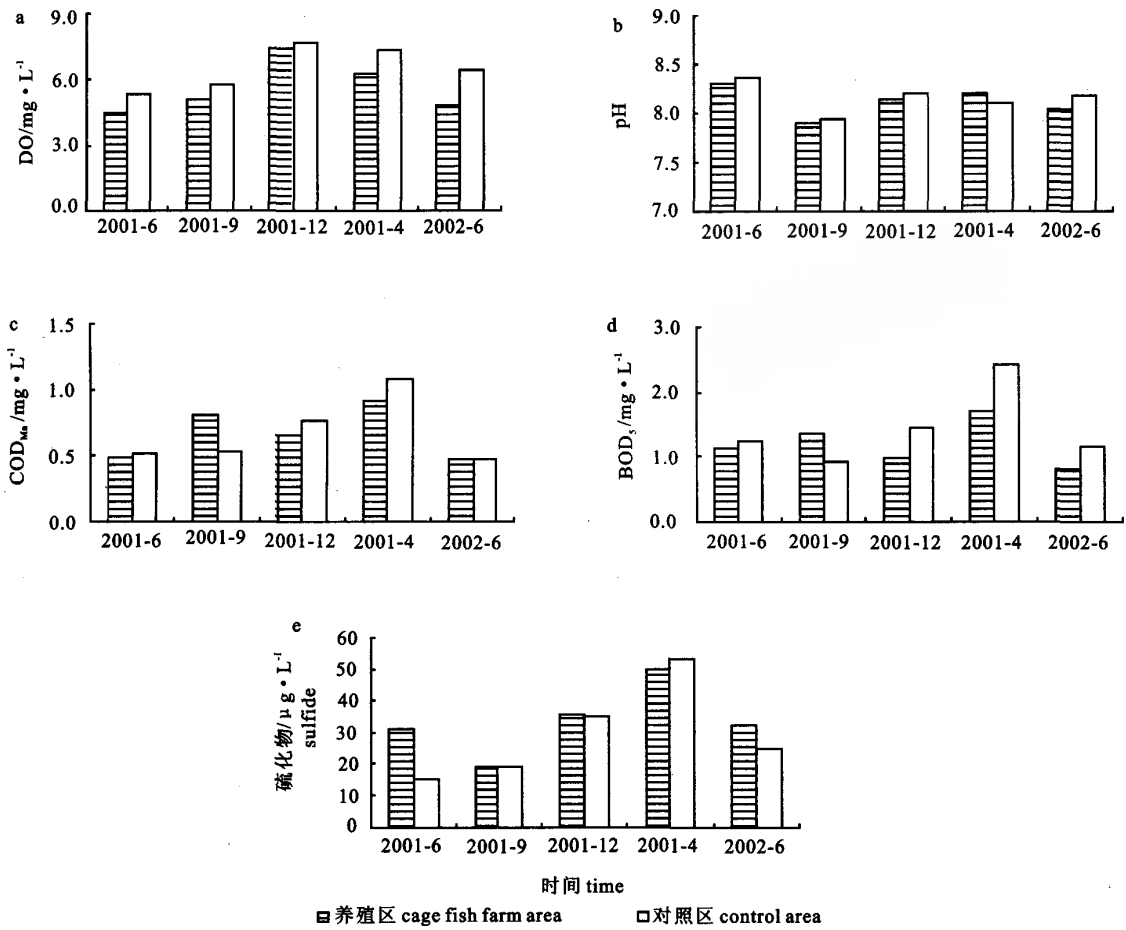


图2 DO、pH、COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物的时空变化
Fig. 2 Spatial-temporal variation of DO, pH, COD_{Mn}, BOD₅ and sulfide

将与各航次监测同时进行的养殖场网箱养鱼情况（养殖容量）现场调查结果分别与全海域 COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物平均浓度进行相关分析（图3），结果发现，海水 COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物均与养殖容量有显著的正相关关系（ $P < 0.05$ ）。可见，该海域海水 COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物的浓度水平的季节变化特征主要与网箱养鱼生产的季节性强的特点有密切关系。

2.3 NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N、PO₄-P 和 SiO₄-Si

表3为海水营养盐 NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N 和无机氮（DIN）的监测结果。养殖区 NO₂-N、NO₃-

N、NH₄-N 和 DIN 的浓度年平均值分别为 0.65 、5.76、3.34 和 9.78 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，对照区分别为 0.42、9.04、1.75 和 11.21 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。养殖区 NO₂-N 和 NH₄-N 浓度水平较对照区高，而对照区 NO₃-N 和 DIN 浓度水平则较养殖区高。NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N 和 DIN 的季节变化特征基本相似，养殖区和对照区一般均以夏、秋季浓度水平平均较高，冬、春季较低，其中 2001 年夏季，养殖区和对照区均有个别站位的 DIN 浓度水平超二类海水水质标准（ $> 21.43 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ）。

表2 网箱养殖区和对照区海水 pH、COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物的时空变化
Tab.2 Spatial-temporal variation of pH, COD_{Mn}, BOD₅, sulfide and pH

时间 time	范围 range	pH		COD _{Mn} /mg·L ⁻¹		BOD ₅ /mg·L ⁻¹		硫化物/μg·L ⁻¹ sulfide	
		FA	CA	FA	CA	FA	CA	FA	CA
2001-6	X ± SD	8.25 ~ 8.36	8.26 ~ 8.45	0.37 ~ 0.70	0.33 ~ 0.74	0.87 ~ 1.67	0.84 ~ 1.95	26.4 ~ 37.7	9.3 ~ 20.7
		8.30 ± 0.05	8.36 ± 0.10	0.49 ± 0.13	0.51 ± 0.21	1.13 ± 0.33	1.25 ± 0.61	30.9 ± 4.3	15.0 ± 5.7
2001-9	X ± SD	7.88 ~ 7.94	7.88 ~ 8.02	0.61 ~ 1.26	0.49 ~ 0.63	1.20 ~ 1.74	0.54 ~ 1.19	14.2 ~ 24.7	12.8 ~ 27.1
		7.91 ± 0.03	7.94 ± 0.07	0.80 ± 0.26	0.54 ± 0.08	1.35 ± 0.23	0.93 ± 0.34	19.3 ± 3.9	19.3 ± 7.2
2001-9	X ± SD	8.00 ~ 8.21	8.13 ~ 8.24	0.54 ~ 0.78	0.62 ~ 0.86	0.89 ~ 1.10	1.23 ~ 1.83	27.4 ~ 46.8	21.5 ~ 58.5
		8.14 ± 0.08	8.19 ± 0.06	0.66 ± 0.11	0.77 ± 0.13	0.99 ± 0.09	1.44 ± 0.34	35.5 ± 7.8	35.1 ± 20.3
2001-9	X ± SD	8.03 ~ 8.35	8.05 ~ 8.20	0.64 ~ 1.37	0.98 ~ 1.24	1.55 ~ 2.04	1.63 ~ 3.10	34.5 ~ 62.3	40.5 ~ 62.3
		8.19 ± 0.14	8.11 ± 0.08	0.91 ± 0.27	1.07 ± 0.14	1.70 ± 0.21	2.42 ± 0.74	49.6 ± 11.6	53.0 ± 11.3
2001-9	X ± SD	7.98 ~ 8.15	8.13 ~ 8.24	0.33 ~ 0.57	0.32 ~ 0.57	0.73 ~ 0.86	1.02 ~ 1.34	27.6 ~ 38.4	21.0 ~ 30.2
		8.04 ± 0.07	8.17 ± 0.06	0.48 ± 0.09	0.47 ± 0.13	0.80 ± 0.06	1.15 ± 0.17	31.9 ± 4.2	24.9 ± 4.8
年平均值 annual average		8.12	8.15	0.67	0.67	1.19	1.44	29.5	33.4

注：FA 表示网箱养殖区；CA 表示对照区
Note: FA denotes cage fish farm area, CA control area.

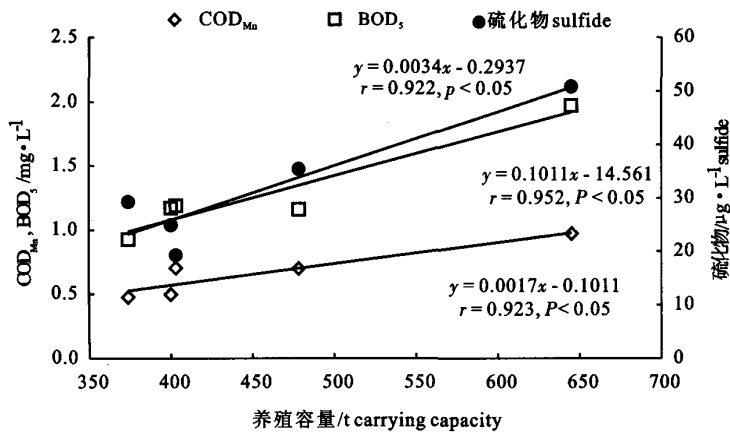


图3 养殖容量与海水 COD_{Mn}、BOD₅ 和硫化物浓度的相关分析

Fig.3 Correlation analysis of carrying capacity with COD_{Mn}, BOD₅ and sulfide concentration

表3 网箱养殖区和对照区海水 NO₂-N、NO₃-N、NH₄-N 和 DIN 浓度的季节变化

Tab. 3 Seasonal variation of NO ₂ -N、NO ₃ -N、NH ₄ -N and DIN in cage fish farm and control area										μmol·L ⁻¹
时间 time	范围 range	NO ₂ -N		NO ₃ -N		NH ₄ -N		DIN		
		FA	CA	FA	CA	FA	CA	FA	CA	
2001-6	X ± SD	0.85 ~ 3.73	0.22 ~ 0.77	2.01 ~ 22.6	7.02 ~ 33.6	0.02 ~ 0.44	0.28 ~ 0.74	5.41 ~ 23.9	5.41 ~ 23.9	
		1.92 ± 1.39	0.56 ± 0.30	7.32 ± 8.64	16.8 ± 14.6	0.24 ± 0.18	0.44 ± 0.26	9.48 ± 8.04	9.48 ± 8.04	
2001-9	X ± SD	0.65 ~ 0.81	0.81 ~ 1.15	8.22 ~ 11.7	10.2 ~ 19.2	0.40 ~ 5.44	0.47 ~ 4.24	12.8 ~ 16.1	12.8 ~ 16.1	
		0.75 ± 0.06	0.94 ± 0.19	10.2 ± 1.40	13.8 ± 4.79	3.59 ± 2.07	1.97 ± 2.00	14.5 ± 1.26	14.5 ± 1.26	
2001-12	X ± SD	0.22 ~ 0.36	0.14 ~ 0.46	0.77 ~ 3.53	0.18 ~ 2.53	1.39 ~ 4.20	0.23 ~ 3.63	3.21 ~ 6.89	3.21 ~ 6.89	
		0.25 ± 0.06	0.33 ± 0.16	2.38 ± 1.01	1.33 ± 1.18	2.77 ± 1.06	1.97 ± 1.70	5.40 ± 1.40	5.40 ± 1.40	
2002-4	X ± SD	0.17 ~ 0.25	0.10 ~ 0.18	1.82 ~ 9.10	2.07 ~ 3.62	4.26 ~ 9.42	1.37 ~ 3.87	7.35 ~ 16.3	7.35 ~ 16.3	
		0.22 ± 0.03	0.15 ± 0.04	4.35 ± 2.96	2.90 ± 0.78	6.06 ± 2.17	2.85 ± 1.31	10.6 ± 3.55	10.6 ± 3.55	
2002-6	X ± SD	0.10 ~ 0.25	0.09 ~ 0.26	1.07 ~ 4.62	1.64 ~ 6.20	1.60 ~ 4.24	1.02 ~ 2.70	4.65 ~ 7.69	4.65 ~ 7.69	
		0.17 ± 0.07	0.17 ± 0.09	2.78 ± 1.60	4.44 ± 2.45	3.07 ± 1.09	1.59 ± 0.96	6.01 ± 1.22	6.01 ± 1.22	
年平均 annual average		0.65	0.42	5.76	9.04	3.37	1.75	9.78	11.21	

注：FA 表示网箱养殖区；CA 表示对照区
Note: FA denotes cage fish farm area, CA control area.

表4 网箱养殖区与对照区各季节海水中 3 种形态无机氮的百分组成

Tab. 4 Percentage composition of three forms of DIN in cage fish farm and control area %						
季节 season	养殖区 cage fish farm area			对照区 control area		
	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄ -N
2001-6	20.3	77.2	2.6	3.2	94.4	2.5
2001-9	5.2	70.2	24.7	5.6	82.5	11.8
2001-12	4.7	44.0	51.3	9.0	36.8	54.2
2002-4	2.8	46.3	51.0	2.7	71.6	25.7
2002-6	1.3	45.3	53.4	0.8	75.7	23.5
年平均 annual average	6.8	56.6	36.6	4.3	72.2	23.5

从 3 种形态无机氮的百分组成情况看，养殖区 NO₂-N、NO₃-N 和 NH₄-N 所占 DIN 的平均百分比分别为 6.8%、56.6% 和 36.6%，而对照区的分别为 4.3%、72.2% 和 23.5%（表4）。可见，养殖区和对照区海水中无机氮主要形态均为 NO₃-N，其次是 NH₄-N，NO₂-N 最少。但养殖区海水中 NH₄-N 所占 DIN 的百分比明显高于对照区，甚至有的季节超过

了 50%，成为无机氮的主要存在形态。可见，网箱养鱼使海水中无机氮的组成在一定程度上发生了改变。

养殖区海水 PO₄-P 浓度年平均值为 0.56 μmol·L⁻¹，明显高于对照区（0.46 μmol·L⁻¹），而 SiO₄-Si 浓度空间分布差异很小，养殖区和对照区的年平均浓度分别为 22.2 和 22.1 μmol·L⁻¹。与 DIN 相

似，养殖区和对照区的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 浓度的季节变化也均是秋季明显高于其他季节（图 4a, b）。

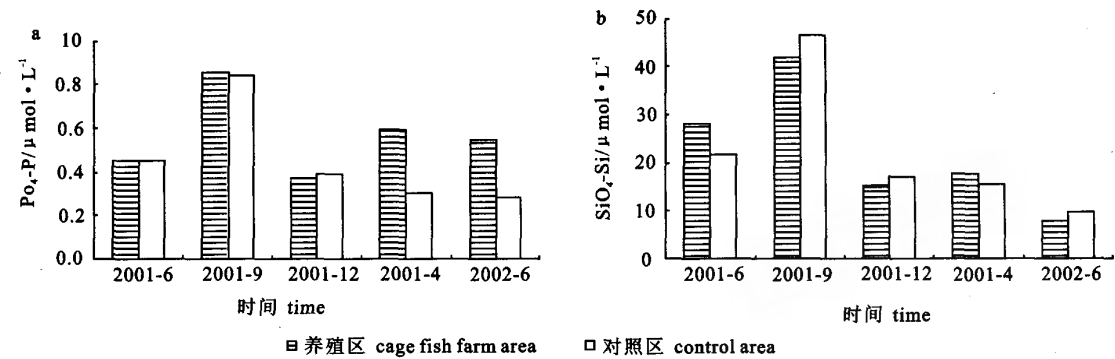


图 4 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 的时空变化
Fig. 4 Spatial-temporal variation of DIP and $\text{SiO}_4\text{-Si}$

表 5 营养盐与盐度和 Chl a 的相关分析

Tab. 5 Correlations of nutrients with salinity and Chl a

	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	DIN	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_4\text{-Si}$
盐度 salinity	-0.461	-0.720	0.104	-0.679	-0.964**	-0.958*
Chl a	-0.514	-0.773	-0.115	-0.823	-0.513	-0.538

注：* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

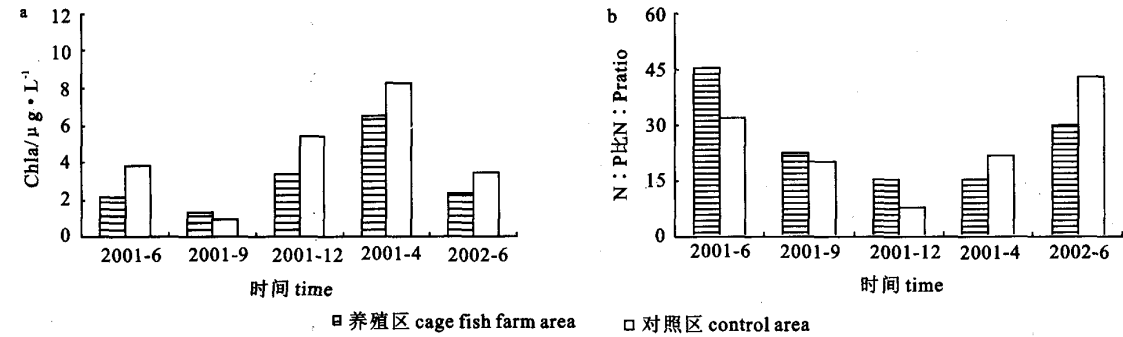


图 5 Chl a 和 N:P 比的时空变化
Fig. 5 Spatial-temporal variation of Chl a and N:P ratio

相关分析表明，全海域除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 外， $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 分别与盐度和 Chl a 有较明显的负相关关系，其中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 与盐度分别有显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 的负相关关系（表 5）。这说明，在盐度较低丰水期，可能因降雨的影响，营养盐将由降水和地表径流带入到该海域，而在冬季和春初季节，降

雨较少，又因浮游植物生长旺盛，将大量消耗了海水中的营养盐。韦桂峰^[22]曾就降雨对大鹏澳海域营养盐的影响做过研究，结果，由降雨过程引起的氮盐大气沉降主要是 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，在丰水期氮盐的大气沉降量约占总氮盐输入量的 35%（不计水产养殖和外海的输入）。因此，降雨和浮游植物对该海

域营养盐浓度的季节变化有重要调控作用。

2.4 Chl a

养殖区和对照区海水中 Chl a 的年平均浓度分别为 3.13 和 $4.18 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 养殖区显著低于对照区 ($P < 0.05$), 其季节变化特征为春季 $>$ 冬季 $>$ 夏季 $>$ 秋季 (图 5a), 这说明春、冬季的水温比夏、秋季更适宜浮游植物生长繁殖, 温度对该海域浮游植物生长繁殖起了主导作用。

从 N:P 比的季节变化情况年, 夏季, 养殖区和对照区的 N:P 比均高于 30, 秋季约为 18, 冬、春季约为 12 (图 5b)。一般认为在外海海域, N:P 比约为 16, 而在近岸海域 N:P 比在 5~15 之间时, 最适于浮游植物的生长^[23]。这表明, 调查海域夏、秋季浮游植物的生长繁殖可能受到 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度相对较低的限制, 而冬、春季的 N:P 比值则较适合浮游植物生长。

3 结论

(1) 大鹏澳海水鱼类网箱养殖海域水环境质量状况较好, 除夏季的 DO 和春季的硫化物浓度超第二类海水水质标准情况较严重外 (超标率均为 62.5%), 其它水环境因子一般不超标。

(2) 养殖区 DO 和 Chl a 的浓度均显著低于对照区 (t -test, $P < 0.05$); 而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度则一般高于对照区, 其他水环境因子的空间分布差异不大。

(3) 海水 COD_{Mn} 、 BOD_5 和硫化物的季节变化主要与网箱养鱼生产季节性强的特点有关; 而水温、盐度、透明度、悬浮物、DO 和 pH 的季节变化主要受控于大亚湾亚热带季风气候, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 DIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ 等营养因子的季节变化主要受降雨和浮游植物的影响, Chl a 的季节变化则主要受水温和 N:P 比的影响, 与网箱养鱼的关系并不明显。

致谢: 甘居利研究员, 杨美兰、王增焕、蔡文贵副研究员和吕晓瑜实验师参与了现场采样和实验室样品分析测试工作, 谨致谢忱。

参考文献:

[1] 日本水产学会. 浅海养殖与自家污染 [M]. 东京: 恒星社厚

生阁, 1977.

- [2] Gowen R J, Bradbury N B. The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review [J]. *Oceanogr Mar Biol Annual Rev*, 1987, 25 (6): 563-575.
- [3] Aure J, Stigebrandt A. Quantitative estimates of eutrophication effects of fish farming on fjords [J]. *Aquac*, 1990, 90 (2): 135-156.
- [4] Holmer M, Kristensen E. Impact of marine fish cage farming on metabolism and sulfate reduction of underlying sediments [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1992, 80 (2): 191-201.
- [5] Wu R S S, Lam K S, MacKay D W, et al. Impact of marine fish farming on water quality and bottom sediment: a case study in the sub-tropical environment [J]. *Mar Environ Res*, 1994, 38 (2): 115-145.
- [6] Wu R S S. The environmental impact of marine fish culture: towards a sustainable future [J]. *Mar Poll Bull*, 1995, 31 (4-12): 159-166.
- [7] Tsutsumi H. Impact of fish net-pen culture on the benthic environment of a cove in South Japan [J]. *Estuaries*, 1995, 18 (2): 108-115.
- [8] Findlay R H, Watling L. Prediction of benthic impact for salmon net-pens based on the balance of benthic oxygen supply and demand [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 1997, 155 (2): 147-157.
- [9] Karakassis I, Tsapakis M, Hatziyanni E, et al. Impact of cage farming of fish on the seabed in three Mediterranean coastal areas [J]. *ICES J Mar Sci*, 2000, 57 (5): 1462-1471.
- [10] La Rosa, Mirto S, Favaloro E, et al. Impact on the water column biogeochemistry of a Mediterranean mussel and fish farm [J]. *Water Res*, 2002, 36 (3): 713-721.
- [11] Yokoyama H. Environmental quality criteria for fish farms in Japan [J]. *Aquac*, 2003, 226 (1-4): 45-56.
- [12] Alongi, D M, Chong V C, Dixon P, et al. The influence of fish cage aquaculture on pelagic carbon flow and water chemistry in tidally dominated mangrove estuaries of peninsular Malaysia [J]. *Mar Environ Res*, 2003, 55 (4): 313-333.
- [13] 何悦强, 郑庆华, 温伟英, 等. 大亚湾海水网箱养殖与海洋环境相互影响研究 [J]. *热带海洋*, 1996, 15 (2): 22-27.
- [14] 何国民, 卢婉嫻, 刘豫广, 等. 海湾网箱鱼场老化特征分析 [J]. *中国水产科学*, 1997, 4 (5): 76-79.
- [15] 林 钦, 李纯厚, 林燕棠, 等. 柘林湾网箱养殖对周围海域环境的影响 [J]. *华南师范大学学报 (自然科学版)*, 1998, (增刊): 36-46.
- [16] 杨美兰, 钟 彦, 林燕棠. 大鹏湾南澳养殖水域的氮、磷含量特征 [J]. *热带海洋*, 1998, 17 (2): 74-80.
- [17] 贾后磊, 温瑛茂, 舒廷飞. 啞铃湾网箱养殖水环境中的营养盐含量及特征 [J]. *海洋环境科学*, 2003, 22 (2): 12-15.

- [18] 王肇鼎, 彭云辉, 孙丽华, 等. 大鹏澳网箱养鱼水体自身污染及富营养化研究 [J]. 海洋科学, 2003, 27 (2): 77 - 81.
- [19] 林修仁, 胡锡钢. 象山港养殖生态和网箱养鱼的养殖容量研究与评价 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [20] GB17378 - 1998, 海洋监测规范 [S].
- [21] GB3097 - 1997, 海水水质标准 [S].
- [22] 韦桂峰. 大亚湾浮游植物对营养盐结构变化的响应和机制 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003.
- [23] 何建宗, 韩国章, Hodgkiss I J. 南中国海及香港海域的赤潮形成机制研究 [A]. 珠江口及沿岸环境研究 [C]. 广州: 广东高等教育出版社, 1995. 77 - 84.