

大鹏澳网箱养殖区沉积物耗氧的初步研究

乔士斌^{1,2}, 林 钦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. 上海水产大学, 上海 200090)

摘要: 2005年5月对大鹏澳海水网箱养殖海域的沉积物进行密闭培养实验, 并进行了水温、DO、BOD₅、COD_{Mn}、pH等环境因子的现场测定。结果表明: 研究海域的沉积物 SOD₂₀ (在 20 ± 2℃下培养) 达到 3.73 (网箱区平均值)、2.70 (贝类养殖区) 和 1.24 g·(m²·d)⁻¹ (对照区)。*t* 检验表明, 在 95% 的置信水平上网箱区 SOD₂₀ 明显高于对照区。回归分析表明沉积物需氧量随培养时间呈非线性变化, 沉积物需氧量与底层海水 DO 的相关系数达到 -0.900 (*P* = 0.05)。

关键词: 大鹏澳; 网箱养殖; 沉积物; 耗氧

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1673-2227-(2006)03-0032-08

Preliminary study on sediment oxygen demand of marine cage aquaculture in Dapeng'ao Bay

QIAO Shibin^{1,2}, LIN Qin¹

(1. Key Lab. of Marine Fishery Ecology Environment and Pollution Monitoring & Control Techniques;
South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Shanghai Fishery University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Sealed incubating experiment about the sediment of seawater cage aquaculture in Dapeng'ao Bay was conducted in May 2005, and in-situ investigation of the environmental factors was also made, these factors include water temperature, DO, BOD₅, COD and pH. The result indicated a significant SOD appeared in the testing area and the values of SOD in cage area were higher than that in the contrast area. Nonlinear variations were determined between SOD and incubation time, meanwhile, preferable pertinences between SOD and DO, COD, BOD₅ and pH were determined.

Key words: Dapeng'ao Bay; cage culture; sediment; oxygen demand

沉积物耗氧速率 (sediment oxygen demand, 简称 SOD) 是由英国的 WELCH^[1] 在 1935 年首次提出的, 是指底层沉积物消耗上覆水体溶解氧 (DO) 的速率, 包括生物呼吸耗氧和化学降解耗氧 2 个过程。1938 年 BAITY 在他的硕士学位论文中第一次

提出可行的测量 SOD 的方法^[1]。

大鹏澳是粤东大亚湾西南侧的一个半封闭型溺谷湾, 其面积仅占大亚湾的 2.3% (约 14 km²), 平均水深约 7 m, 位于其南部的网箱养殖海域水深 3 ~ 5 m, 澳内水流缓慢, 适宜水产养殖^[2]。大鹏

澳鱼类网箱生产管理比较粗放^[3], 为了获得较好的效益, 渔民增加投饵量或进行不合理投饵, 大量的残饵和鱼类排泄物沉淀到海底, 造成底质中有机质含量局部增加^[4], 有机质在沉积物中的堆积促使底栖生物和分解有机物质的微生物群落迅速增长, 导致沉积层中的耗氧大大增加^[5], 当底质中有机质分解的耗氧速率超过上覆水的供氧速率时, 水下的沉积物就开始形成水-沉积物界面的氧化层及其下的还原层。在氧化层中, 由于好氧菌分解有机质的耗氧而使溶氧减少, 使之转化为嫌气性厌氧状态, 最后因溶氧被耗尽而转化为厌氧状态。底质处于厌氧状态下, 有机质被异养细菌不断分解转化为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 H_2S , 使得底质中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 H_2S 含量不断升高^[6]。造成了养殖过程中的自身污染效应长期积累, 又因没有得到有效的防治, 致使养殖水域生态环境不断恶化, 富营养化现象日趋严重^[7]。

有研究表明, 网箱下部沉积物中其耗氧率比对照区要高 2~5 倍^[8], 养鱼网箱附近富含 C、N、P 的沉积物中存在着缺氧、无氧状态区^[9], 网箱沉积物耗氧量占到总耗氧量的一半以上。因此, 网箱养殖海域沉积物的 SOD 速率在综合评价水体水质

和环境特征时是一个非常有用的参数^[10], SOD 与沉积物中有机质含量和底层海水温度密切相关^[11]。

本文尝试从沉积物 SOD 的角度出发, 初步探索大鹏澳网箱养殖海域的沉积物及水体的有机污染状况。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与测定

采样站位如图 1 所示, 大鹏澳网箱区养殖海域沉积物的需氧量为一系列研究, 共设 10 个站位, 本实验为初步研究, 由于实验仪器等条件限制, 取其中的 3、4、5、6、10 号站作为研究对象, 其中 3、4、5 号站位于网箱区内, 6 号站位于浮筏贝类养殖区, 10 号站作为对照站点, 各站位的经纬度如表 1 所示。分别采集各个站点表、中、底层的海水样品, 现场测定了水温、DO、pH, 在室内测定水样的 BOD_5 和 COD_{Mn} 。并在每个站点用柱状采泥器采集柱状沉积物样品, 取上端 10 cm 密封好, 立即带回实验室。并取底层海水作为培养用水。各水质因子、沉积物的分析方法均按《海洋监测规范》^[12] 中所规定的分析方法进行。

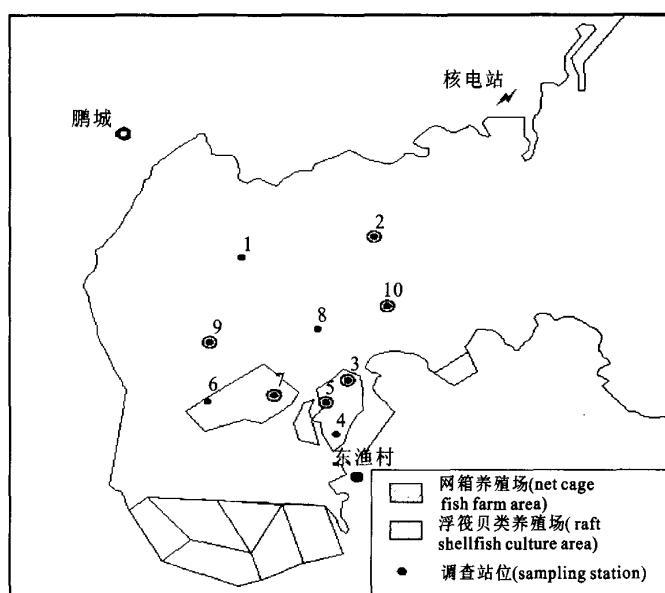


图 1 大鹏澳网箱养殖海域采样站位

Fig. 1 Sampling stations of fish cage aquaculture area in Dapeng'ao Bay

表1 采样站位经纬度

Tab. 1 The latitude and longitude of the sampling stations' position

站位 station	经度 longitude	纬度 latitude
1	E 114°30. 9366'	N 22°34. 6483'
2	E 114°31. 5133'	N 22°34. 7614'
3	E 114°31. 3982'	N 22°33. 9813'
4	E 114°31. 3464'	N 22°33. 6855'
5	E 114°31. 3021'	N 22°33. 8597'
6	E 114°30. 7887'	N 22°33. 8645'
7	E 114°31. 0870'	N 22°33. 8990'
8	E 114°31. 2635'	N 22°34. 2611'
9	E 114°30. 7972'	N 22°34. 1867'
10	E 114°31. 5725'	N 22°34. 3826'

1.2 沉积物密闭培养实验

国内外有关沉积物耗氧速率测定方法的研究中，既有采用现场测定的，也有采用室内模拟的。有的研究者认为，实验室法对底泥产生的扰动大，且无法精确再现水体实际环境等缺陷会影响 SOD 的测定准确度，而现场测定可以使底泥、水底生物和周围环境的人为作用因素最小化，因此测定结果更加可靠^[13]。虽然现场模拟更接近于实际，但系统环境条件人为调节困难。EDBURG 等^[14]做了室内比较实验，认为室内模拟与现场模拟结果虽有少量差别，但室内实验更易于控制。因此，本次实验采用密闭培养的方法，模拟自然状况，在受控的条件下，研究网箱养殖海域沉积物的耗氧情况。

1.2.1 实验方法 国内外许多有关沉积物需氧量的研究均采用 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，有关监测资料显示，大鹏澳海区水温的变化范围为 $16.0 \sim 29.7^\circ\text{C}$ ，为了便于进行比较和使实验条件更接近于自然状况，本实验的培养温度设定为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 。将 10 cm 厚的柱状样转移至长度为 50 cm 的培养管中（内径 5 cm），塞紧下端橡皮塞，从上端缓慢注入天然海水 0.40 L。把培养管小心放入恒温培养箱内，塞紧上端橡皮塞并与 BODTrak™ 紧密连接，调节水浴温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，检验装置的气密性，开启 BODTrak™，进入实验培养阶段，培养时间为 5 d。培养海水注入前经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤，充分暴氧使溶解态的有机质氧化并除去海水中的悬浮态有机质，以消除海水的本底影响。

1.2.2 实验原理 实验装置如图 2 所示，借鉴

BODTrak™（水质 BOD 测定仪，美国哈希公司生产）的测定原理，将 BODTrak™ 与柱状沉积物样品密闭培养管紧密连接，沉积物中的微生物氧化有机物产生的 CO_2 被吸收以后，密闭系统内产生的压力差与被吸收的 O_2 量成正比例。这个压力差被仪器转换成以 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示沉积物的耗氧量。然后再根据培养管的横截面积、培养海水的体积和培养时间，把以 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示的沉积物需氧量结果换算为以 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 表示的沉积物耗氧速率 SOD_{20} 。

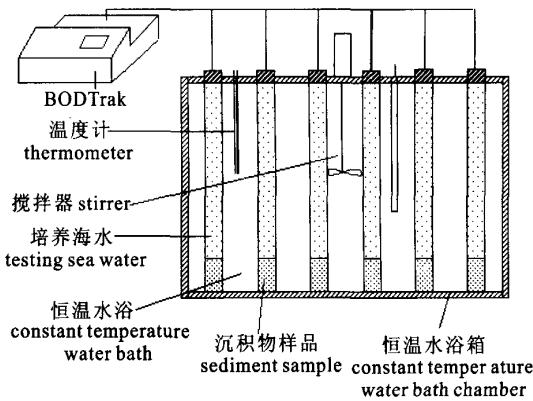


图 2 沉积物 SOD 密闭培养装置图

Fig. 2 Schematic of experimental equipment

1.2.3 沉积物耗氧速率的计算 沉积物耗氧速率是指沉积物在单位时间、单位面积内消耗上覆水体 DO 的速率。本实验由 BODTrak™ 直接测得实验期间，培养管内沉积物的需氧量 (ΔDO)，单位以 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 表示，再根据培养管的截面积 (S ，单位： m^2)、培养海水的体积 (V ，单位：L) 和培养时间 (t ，单位：d)，换算为以 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 表示的沉积物耗氧速率 SOD_{20} ，得到计算公式如下：

$$\text{SOD}_{20} = \frac{\Delta\text{DO} \cdot V}{S \cdot t}$$

本公式与雷衍之等^[15]推算出的公式吻合。

2 结果与讨论

2.1 培养期间沉积物需氧量的变化情况

表 2 列出了每隔 0.50 d 沉积物的需氧量，在 0.00 ~ 1.00 d 间，沉积物需氧量随时间变化曲线出现一段非常态变化，但是随培养时间的增加，各个站点的沉积物需氧量均迅速升高，最后趋于缓和，整个过程呈现非线性变化（图 3）。这一点与溶氧

动力学研究得到的结果不同，并未出现 SOD 随时间的线性变化^[16]的情况。

表 2 大鹏澳养殖海域沉积物的需氧量

Tab. 2 Sediment oxygen demand in Dapeng'ao Bay mg·L⁻¹

培养时间/d experimental time	网箱养殖区 cage area			贝类养殖区 shellfish area	对照区 contrast area
	3号站 sta. 3	4号站 sta. 4	5号站 sta. 5		
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.50	4.4	3.4	3.0	7.2	-2.6*
1.00	19.4	17.2	22.0	15.2	5.2
1.50	26.2	26.4	30.6	24.4	10.8
2.00	31.6	32.0	36.6	29.0	19.2
2.50	37.4	36.2	42.8	33.2	25.0
3.00	42.6	40.2	48.2	38.4	30.4
3.50	48.2	44.8	52.6	41.4	35.4
4.00	52.2	50.0	58.2	43.0	38.6
4.50	56.8	51.8	61.2	44.4	39.8
5.00	58.2	55.2	63.4	44.2	42.2
5.25	61.2	56.4	65.4	43.9	43.6

注: * 实验室过程出现的异常值, 计算时予以剔除

Note: * Outliers appeared in the incubation process were eliminated in the calculation.

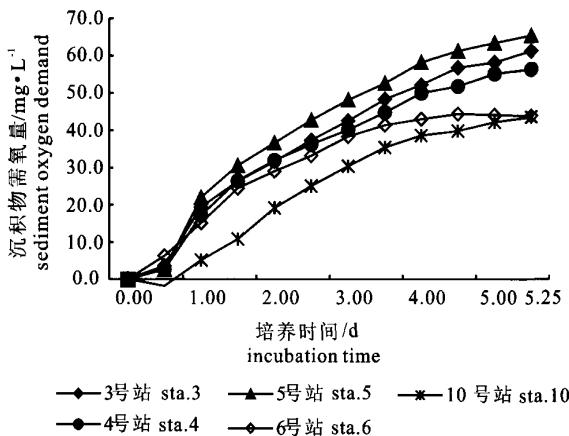


图 3 沉积物需氧量随培养时间变化

Fig. 3 Temporal variation of SOD

实验初期出现的非常态变化可能是由于沉积物中的大量微生物因外部环境发生改变而导致活性下降所致。而后需氧量迅速增大是由于实验前期培养海水 DO 较高, 沉积物中大量微生物分解有机质, 造成 DO 快速消耗。当海水 DO 下降至一定水平时, 微生物活性便受到抑制, 表现为沉积物需氧量下降。因此, 当海水 DO 浓度降低时, 底泥需氧量会明显下降; 而当海水 DO 浓度升高时, 底泥需

氧量也会相应地增加。

应用 SPSS 统计分析软件对沉积物需氧量数据进行非线性回归分析^[17], 培养时间 (*t*) 作为自变量, 需氧量 (SOD) 作为因变量, 结果显示三次函数 (Cubic 函数) 的拟合优度最高, *R*² 统计量的值均在 0.99 以上, 其中 6 号站的 *R*² 最高, 达到 0.995。5 号站的最低, 为 0.990。以 6 号站为例, 对 SOD 数据进行 Cubic 函数拟合, 得到拟合曲线符合方程 $SOD = -0.00001t^3 - 0.0009t^2 + 0.6449t + 0.0773$ 的描述。如图 3 所示, 实验刚开始时, 体系中充足的有机物质和 DO 浓度, 使得好氧细菌大量繁殖, 表现为需氧量增加非常迅速。在培养至 3.75 d 时, 需氧量增长逐渐变缓, 曲线的斜率逐渐变小, 最后接近于 0。这说明随着培养实验的进行, 沉积物中大量的有机物质被细菌分解利用, 体系 DO 不断降低, 逐渐对底泥中生物的呼吸、微生物分解作用和还原性物质氧化产生影响和限制作用^[18], 有机物质的分解作用减弱, 于是需氧量逐渐减小便成为必然。这也说明自然海区近底层处海水 DO 含量可对沉积物需氧量产生重要的影响^[19]。可见, 大鹏澳养殖海域沉积物的氧化分解作用对上层水体环境产生较大影响, 并且由于底层较低的海水 DO 条件使得沉积物氧化分解作用减弱, 造成大量有机污染物在沉积物中的积累。5 号站的情况也可以说明这一点 (图 4)。但是, 我们不难看出, 5 号站的曲线斜率明显大于 6 号站, 显然是因为 5 号站和 6 号站沉积物的来源不同造成的。5 号站位于污染较重的网箱养殖区, 而 6 号站位于贝类养殖区。另外, 其它几个站点也存在类似的变化规律, 这里不再赘述。

2.2 沉积物的需氧量

本实验共得沉积物需氧量 SOD₂₀ 数据 630 个, 表 3 列出了每隔 0.5 d 沉积物的耗氧速率。结果表明, 网箱区 (图 1 中 3、4、5 号站) 内为 3.30 ~ 4.27 (平均 3.73) g·(m²·d)⁻¹, 其中 5 号站最高 [为 4.27 g·(m²·d)⁻¹], 4 号站最低 [为 3.30 g·(m²·d)⁻¹]。贝类区 (6 号站) 为 2.70 g·(m²·d)⁻¹, 对照区 (10 号站) 为 1.24 g·(m²·d)⁻¹。网箱区平均是对照区的 2.9 倍, 是贝类区的 1.4 倍 (图 5)。可见网箱区内和网箱区外差别是非常明显的。网箱养殖区沉积物耗氧速率过高的原因可能是

由于网箱养殖多是采取高密度的投饵养殖，养殖过程中所产生的残饵、鱼类粪便等有机物在沉积物中

堆积，促使底部微生物群落迅速增长，最终导致沉积层的耗氧量大大增加^[5]。

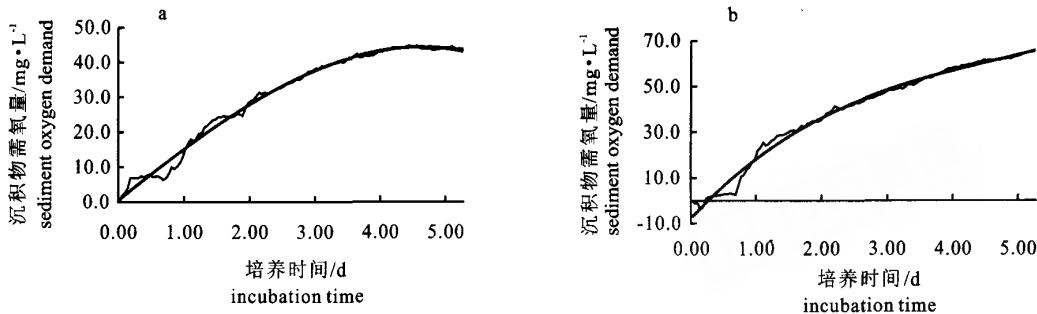


图4 5和6号站沉积物需氧量与培养时间的拟合曲线图

a. 6号站；b. 5号站

Fig. 4 Curve estimation of SOD and incubating time in sta. 5 and sta. 6

a. sta. 6；b. sta. 5

表3 大鹏澳养殖区沉积物的耗氧速率

Tab. 3 Sediment oxygen demand in Dapeng'ao Bay $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$

培养时间/d experimental time	网箱养殖区 cage area			贝类养殖区 shellfish area	对照区 contrast area
	3号站 sta. 3	4号站 sta. 4	5号站 sta. 5		
0.50	5.28	4.48	4.16	7.52	-0.32*
1.00	5.60	4.72	6.64	3.92	-0.08*
1.50	4.27	4.32	5.44	3.79	0.16
2.00	3.56	3.64	4.56	3.04	1.08
2.50	3.65	3.46	4.51	2.98	1.66
3.00	3.44	3.12	4.19	2.88	1.81
3.50	3.34	2.93	3.82	2.54	1.85
4.00	3.18	2.96	3.78	2.26	1.82
4.50	3.08	2.63	3.47	1.97	1.56
5.00	2.62	2.38	3.04	1.50	1.34
5.25	2.65	2.29	2.97	1.33	1.31
平均值	3.62	3.30	4.27	2.70	1.24
average				3.73	

注：* 实验过程出现的异常值，计算时予以剔除

Note: * Outliers appeared in the incubation process were eliminated in the calculation.

贝类区达到了 $2.70 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，低于网箱区的任何一个站位，但高于自然海域的沉积物 SOD^[20]。值得注意的是对照区达到了 $1.24 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，但低于网箱养殖区 [平均 $3.73 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]，也低于贝类养殖区 [$2.70 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]，起到了对照站点的作用，能够反应大鹏澳网箱养殖海域沉积物 SOD 的变化规律，即：网箱养殖区 >

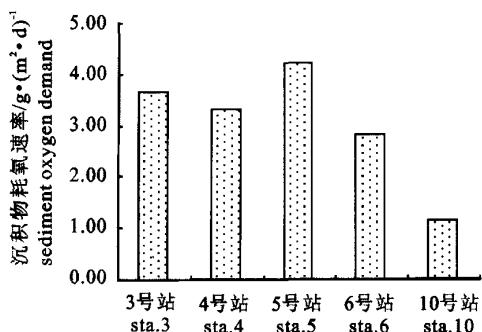


图5 各个站位的沉积物耗氧速率

Fig. 5 Sediment oxygen demand in each sampling station

贝类养殖区 > 对照区。但是，对照区达到了 $1.24 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，明显高于天然海域沉积物 SOD^[20]，可能是因为大鹏澳海区潮流是从澳北侧进入的，然后呈反时针回转至该澳南侧流出。而水产网箱养殖区位于澳内西南部^[21]，对照站 10 号站离网箱区比较近，且处于大鹏澳的湾口处，水流较急，退潮时网箱区富含有机质的沉积物向湾口处迁移，使得该处沉积物中有机质含量较高。

BERTHELSON 等^[22]曾测定养鱼池塘（养殖年限为 3 年）沉积物耗氧速率，使用的温度（ 29°C ）高于本实验温度，得到 SOD_{29} 为 $4.44 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，由于沉积物耗氧速率受到温度的影响^[23]，利用范德霍夫方程 $SOD_t = SOD_{20} \cdot \Phi^{t-20}$ （其中， t 为实验水温， Φ 为温度系数，实验水体沉积物耗氧温度系

数为 1.066) 进行校正后为 $2.50 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。孙耀^[24]测定虾塘(养殖年限为 10 年)沉积物的总耗氧量得到的值 [$3.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]。实验测得网箱区沉积物的平均耗氧速率 [$3.73 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 是 BERTHELSON 等的实验结果 [$2.50 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 的 1.5 倍, 而与具有 10 年养殖年限的虾塘底质耗氧速率 [$3.77 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 非常接近, 说明本实验海区沉积物的有机污染已经相当严重。

2.3 沉积物 SOD 与海水 DO 的关系

现场测定表、中、底层海水的 DO, 结果如表

表 4 大鹏澳养殖海域的水质因子

Tab. 4 Water quality factors of aquaculture area in Dapeng'ao Bay

站位 station		网箱养殖区 cage area			贝类养殖区 shellfish area		对照区 contrast area	
		3 号站 sta. 3	4 号站 sta. 4	5 号站 sta. 5	6 号站 sta. 6	10 号站 sta. 10		
水深/m sea water depth		5.7	4.5	5.5	5.5	7.5		
水温/°C temperature	表层 surface	26.8	26.8	26.7	26.7	27.0		
	中层 middle	26.8	26.8	26.8	26.7	26.8		
	底层 bottom	26.5	26.6	26.5	26.1	25.9		
DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ dissolved oxygen	表层 surface	9.31	8.24	9.16	9.25	9.53		
	中层 middle	9.18	8.50	8.65	9.28	9.57		
	底层 bottom	8.33	7.99	8.35	8.76	8.95		
pH	表层 surface	8.21	8.24	8.25	8.13	8.16		
	中层 middle	8.15	8.21	8.21	8.14	8.20		
	底层 bottom	8.11	8.18	8.24	8.13	8.16		
BOD ₅ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ biochemical oxygen demand	表层 surface	1.17	1.07	1.07	0.96	0.76		
	中层 middle	1.25	1.37	1.07	1.10	0.93		
	底层 bottom	1.27	1.59	1.44	1.16	1.18		
COD _{Mn} / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ chemical oxygen demand	表层 surface	0.32	0.30	0.31	0.36	0.50		
	中层 middle	0.70	0.65	0.38	0.37	0.53		
	底层 bottom	0.77	0.70	0.24	0.38	0.60		

DO 的最高值出现在 10 号站的中层, 最低值出现在 4 号站的底层。从 DO 的垂直分布来看, 变化规律比较明显, 呈现由表层至底层依次递减的趋势。

如表 5 所示, SOD₂₀ 值 [为 $4.27 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 最高的 5 号站 (水深为 5.5 m), 底层海水的 DO ($8.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 是比较低的, 海水 DO 的降低幅度达到了 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。海水 DO 降低幅度最大的 3 号站 (水深为 5.7 m), SOD 值达到了 $3.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 是比较高的。利用 SPSS 进行二元定距变

4 所示, 网箱区和对照区均出现了较高的 DO 值, 变化范围为 $7.99 \sim 9.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体、网箱区外、网箱区内平均值分别为 8.87 、 9.22 、 $8.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。所得结果均高于甘居利等^[25]测定的结果 (变化范围为 $4.52 \sim 8.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体、网箱区外、网箱区内平均值分别为 6.24 、 6.81 、 $5.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。究其原因可能是因为本次实验是在 5 月份进行, 当时气温 29°C , 风速较大, 空气-水界面气体交换作用比较强, 使得海水 DO 浓度较高。

量的相关分析, 沉积物 SOD₂₀ 和底层海水 DO 的相关性系数 R 达到 -0.900 , 在显著性水平为 0.05 时, 统计检验的相伴概率为 0.037。说明二者显著负相关。

这说明沉积物的 SOD 与底层海水 DO 之间存在着较强的相互影响。有机污染较重的海区, 沉积物的 SOD 一般也较高, 较高的 SOD 速率导致较高的水-沉积物 DO 输送, 加之大鹏澳海域水深较浅, 平流供氧较差, 底层水体 DO 偏低便不足为奇了。

表5 大鹏澳网箱养殖海域沉积物 SOD 与海水 DO 变化关系表

Tab. 5 Relationship between sediment oxygen demand and seawater DO variation in Dapeng'ao Bay

项目 item	3号站 sta. 3	4号站 sta. 4	5号站 sta. 5	6号站 sta. 6	10号站 sta. 10
水深/m water depth	5.7	4.5	5.5	5.5	7.5
SOD ₂₀ /g·(m ² ·d) ⁻¹ sediment oxygen demand	3.62	3.30	4.27	2.70	1.24
底层海水 DO/mg·L ⁻¹ DO of bottom sea water	8.33	7.99	8.35	8.76	8.95
海水 DO 降低幅度 ΔDO/mg·L ⁻¹ reducing range of DO	0.98	0.25	0.81	0.49	0.58

2.4 沉积物 SOD 与水体 BOD₅ 的关系

本次实验 5 个站点的 BOD₅ 如表 4 所示, BOD₅ 的垂直分布规律比较明显, 呈现由表层至底层依次增加的趋势。SOD₂₀ 值最高的 5 号站, 底层海水的 BOD₅ 达到了 1.44 mg·L⁻¹, 是比较高的。而 SOD₂₀ 值最低的 10 号站, 其底层海水的 BOD₅ 为 1.18 mg·L⁻¹, 是比较低的。这说明沉积物 SOD 与底层水体的 BOD₅ 也存在着一定的相关性。SOD 与 ΔBOD₅ (底层海水 BOD₅ 与表层海水 BOD₅ 的差值) 的相关系数 R = 1.000 (P = 0.014), 与底层海水 BOD₅ 的相关系数 R = 0.600 (P = 0.285) (表 6)。造成这种情况的原因可能是沉积物 SOD 值高的海区, 沉积物中存在着大量的有机污染物质, 在生物活动、水体交换等的影响下, 沉积物中的有机物质向水体迁移, 造成底层水体较高的 BOD₅。

表6 沉积物 SOD 与水质因子的关系

Tab. 6 Relationship between sediment oxygen demand and water quality factors

项目 item	R	P
ΔBOD ₅	1.000	0.014
ΔCOD _{Mn}	0.800	0.200
ΔpH	0.667	0.219
底层海水 BOD ₅ BOD ₅ in bottom water	0.600	0.285
底层海水 COD _{Mn} COD _{Mn} in bottom water	0.900	0.037
底层海水 pH pH in bottom water	0.300	0.624

2.5 沉积物 SOD 与水体 COD_{Mn} 的关系

如表 4 所示, 水体 COD_{Mn} 的变化趋势也比较明显, 由表层、中层、底层依次递增 (5 号站除外)。增加幅度最大的是 3 号站, 达到了 0.45 mg·L⁻¹。其次是 4 号站, 增加 0.40 mg·L⁻¹。6 号站和 10 号站的增加幅度都比较小。SOD 与 ΔCOD_{Mn} (底层海水 COD_{Mn} 与表层海水 COD_{Mn} 的差值) 的相关系数为 0.800 (P = 0.200), 与底层海水 COD_{Mn} 的相关系数为 0.900 (P = 0.037) (表 6)。这也可以说明网箱养殖区的底层水体有机物质浓度较高, 沉积物向上层水体进行的有机物质输送是造成这种现象的原因。

另外, 从表 4 还可以看出, 水体 pH 也呈现一定的规律性, 网箱区的 3 号、4 号和 5 号站, 水体 pH 由表层、中层、底层依次递减。而位于贝类养殖区的 6 号站和对照点 10 号站, 水体 pH 则没有明显的规律性。如表 6 所示, SOD 与 ΔpH (底层海水 pH 与表层海水 pH 的差值) 相关系数 R = 0.667 (P = 0.219), 与底层海水 pH 的相关系数 R = 0.300 (P = 0.624), 说明沉积物分解作用对海水 pH 的垂直分布产生一定影响, 而与底层海水 pH 关系不大。究其原因, 可能是因为网箱区沉积物的有机污染较重, 沉积物中细菌的分解活动比较剧烈, 产生酸性物质。

3 小结

- (1) 大鹏澳网箱养殖海域沉积物需氧量在培养前期随培养时间的增加而增加, 培养后期逐渐趋于缓和, 其变化符合 Cubic 函数的描述。
- (2) 大鹏澳网箱养殖区沉积物 SOD 出现了较

高的值, 平均为 $3.73 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 是对照区的 2.9 倍, 是贝类区的 1.4 倍。与文献报道的 SOD 结果比较, 大鹏澳网箱养殖区沉积物的有机污染已相当严重。

(3) 沉积物 SOD 与底层海水 DO 呈显著负相关 ($R = -0.900$, $P < 0.05$), 与海水 ΔBOD_5 ($R = 1.000$, $P = 0.014$) 和底层海水 COD ($R = 0.9000$, $P = 0.037$) 呈显著正相关。

参考文献:

- [1] WAYNE S D. Brief history of sediment oxygen demand investigation [C] // HATCHER K J. Sediment oxygen demand—processes, modeling, and measurement. Athens: University of Georgia, Institute of Natural Resources, 1986: 9–17.
- [2] 彭云辉, 王肇鼎. 大亚湾大鹏澳养殖海区水化学指标的变化及营养状况分析 [J]. 台湾海峡, 1999, 18 (1): 26–32.
- [3] 甘居利, 林钦, 黄洪辉, 等. 大鹏澳网箱养殖区底质硫化物分别、变化和污染分析 [J]. 水产学报, 2003, 27 (6): 571–574.
- [4] 蔡青海, 杜琦, 卢振彬, 等. 福建省主要港湾沉积物中硫化物的分布 [J]. 台湾海峡, 2004, 23 (1): 24–32.
- [5] AXLER R, TIKKANEN C, MEDONALD M, et al. Water quality issues associated with aquaculture: A case study in mine pit lakes [J]. Water Environ Res, 1996, 68 (6): 995–1011.
- [6] 钟硕良, 陈月忠, 林克冰, 等. 虾池底质中 NH_4^+ -N、 S^{2-} 和异养细菌含量的变化及其相关性研究 [J]. 台湾海峡, 1997, 16 (4): 449–454.
- [7] 黄洪辉, 林钦, 贾晓平, 等. 海水鱼类网箱养殖场有机污染季节动态与养殖容量限制关系 [J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2003, 8 (2): 101–105.
- [8] WU R S. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future [J]. Mar Poll Bull, 1995, 31 (4/12): 159–166.
- [9] BEVERIDGE M C M, ROSS L G, KELLY L A. Aquaculture and biodiversity [J]. Ambio, 1994, 23 (8): 497–502.
- [10] ROLLEY H L J, OWENS M. Oxygen consumption rates and some chemical properties of river muds [J]. Water Res, 1967, 1: 759–766.
- [11] CRAMER A. Seasonal variation in benthic metabolic activity in a frontal system in the North Sea [C] // GIBSON M B R. Proceedings of the 24th European Marine Biology Symposium. Aberdeen: Aberdeen Academic Press, 1990: 54–76.
- [12] 国家海洋局. 海洋监测规范 [S]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [13] WU R S S. A respirometer for continuous, in-situ, measurement of sediment oxygen demand [J]. Water Res, 1990, 24 (3): 391–394.
- [14] EDBURG N, HOFSTEN B V. Oxygen uptake of bottom sediment studied in situ and in the laboratory [J]. Water Res, 1973, 7 (1): 285–294.
- [15] 雷衍之, 朴文豪, 白禄君, 等. 养鱼池底泥耗氧速率的研究 [J]. 大连水产学院学报, 1992, 6 (3/4): 6–13.
- [16] SEIKI T, IZAWA H, DATE E. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay [J]. Water Res, 1989, 23 (2): 219–228.
- [17] 余建英, 何旭宏. SPSS for Windows 统计分析教程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [18] 张永良, 刘培哲. 水环境容量综合手册 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 600–601.
- [19] 范成新, 相崎守弘, 福岛武彦, 等. 霞浦湖沉积物需氧速率的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1998, 29 (5): 508–513.
- [20] FELEKE AREGA, JOSEPH H, LEE W. Long-term circulation and eutrophication model for Tolo Harbour, Hong Kong [J]. Water Quality & Ecosystem Modeling, 2000, 1 (1): 169–192.
- [21] 孙丽华, 陈浩如, 彭云辉, 等. 大亚湾大鹏澳周边河流中营养盐的分布及入通量的估算 [J]. 台湾海峡, 2003, 22 (2): 211–217.
- [22] BERTHELSON C R, CATHCART T P, POTE J W. In situ measurement of sediment oxygen demand in catfish ponds [J]. Aquac Engin, 1996, 15 (4): 261–271.
- [23] PORCELLA D B, MILLS W B, BOWIE G L. A review of modeling formulations for sediment oxygen demand [C] // HATCHER K J. Sediment oxygen demand—processes, modeling, and measurement. Athens: University of Georgia, Institute of Natural Resources, 1986: 121–138.
- [24] 孙耀. 虾塘底质的总耗氧量及其季节变化 [J]. 应用生态学报, 1996, 7 (1): 110–112.
- [25] 甘居利, 林钦, 黄洪辉, 等. 大鹏澳网箱养殖海域海水溶解氧浓度影响因素分析 [J]. 海洋环境科学, 2004, 23 (3): 1–3.