

鱼类和无脊椎动物的培养

封闭系统中水的管理

中国科学院海洋研究所科技情报组译

《鱼类和无脊椎动物的培养》 目录

第一部分 动物对饲养水的影响

第一章 生物过滤

1. 定义和作用	(1)
2. 滤床的管理	(2)
3. 负载量的测定	(9)
4. 调整系统	(11)
5. 碎屑形成的机制	(12)

第二章 机械过滤

1. 定义和作用	(11)
2. 砂砾机械过滤的机制	(11)
3. 用生物滤床进行机械过滤	(15)
4. 快速砂滤	(16)
5. 硅藻土滤器	(18)
6. 影响硅藻土滤器效率的因素	(21)
7. 套筒的阻塞及其排除	(23)
8. 对各种滤器的评价	(25)

第三章 化学过滤

1. 定义和作用	(26)
2. 溶解有机物的吸附清除法	(27)
3. 溶解有机物的泡沫分离清除法	(34)
4. 溶解有机物的氧化清除法	(38)
5. 对各法的评价	(39)

第四章 二氧化碳系统

1. 术语的定义	(40)
2. 碳酸离子和酸式碳酸离子的来源	(40)
3. 影响无机碳酸盐溶解度的诸因素	(44)
4. pH的稳定: 引起 pH 逐渐降低的因素	(46)
5. pH的重要性	(47)

第二部分 饲养水对动物的影响

第五章 呼吸作用

1. 影响氧溶解度的因素	(48)
--------------------	--------

2. 温度	(48)
3. 影响呼吸作用的其他因素	(51)

第六章 盐类和元素

1. 盐度、氯度和比重	(53)
2. 各元素的作用及其吸收	(53)
3. 各元素的毒性	(59)
4. 人工海水	(59)

第七章 毒性代谢物

1. 毒性代谢物的影响面	(66)
2. 氨	(66)
3. 刺激传递素	(69)

第八章 控制环境以防疾病

1. 免疫和环境	(71)
2. 疾病的预防和环境	(72)
3. 疾病的治疗	(74)

第九章 实验室测定方法

1. 氨 (以总 NH_4 计)	(75)
2. 亚硝酸盐和硝酸盐	(76)
3. 盐度和比重的测定	(76)
4. 溶解氧	(76)

水族饲养译文目录

水族馆的作用及前景	(79)
水族饲养和栽培渔业相结合	(82)
鱼类性成熟和外界环境因素	(86)
海藻在循环式水槽中的养活问题	(90)
循环过滤饲养法及其水质管理	(95)
循环式水槽的容纳密度	(101)
水族人工控制环境设备的发展	(106)
水生动物饲养槽的水质管理	(112)
水族馆的设计	(115)
人工海水	(119)
水族馆饲养鱼类的鱼病及其防治措施	(122)

第一部分 动物对饲养的影响

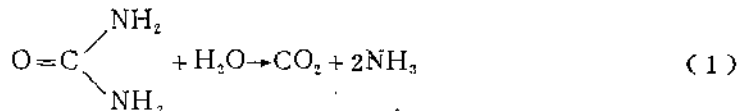
第一章 生物过滤

1. 定义和作用

在封闭的培养系统中，应用的过滤方法有生物过滤法、机械过滤法和化学过滤法三种，其中以生物过滤法最重要。

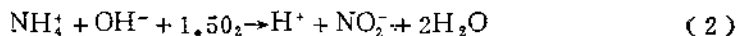
生物过滤是指悬浮在水中和附着在滤床砂砾上的细菌所进行的有机氮化合物的矿化作用、硝化作用和脱氮作用。

异养和自养细菌为培养系统中的主群，异养种群利用动物排出的有机氮化合物作为能源，把它们转化为简单化合物，如氨。这些有机物的矿化作用是生物过滤中的第一阶段，它分二步完成：氨化作用，即蛋白质和核酸的化学分解，产生氨基酸和有机含氮碱；和脱氨基作用，在此过程中，有机物的一部分和某些氨化作用的产物转化为无机化合物，如尿素分解（反应式1）产生二氧化碳和没有离子化的氨即为其一例（这种反应也可以是纯化学过程，但氨基酸和有关物质的脱氨基作用需有细菌参加）



当有机物一经异养菌矿化，生物过滤便进入第二阶段——硝化作用。硝化作用就是借助自养细菌使氨氧化为亚硝酸盐以及使亚硝酸盐氧化为硝酸盐，如图1所示。它们和异养菌不同，它们需要无机物作能源，二氧化碳是它们唯一的碳源。

亚硝酸菌（*Nitrosomonas sp.*）和硝化菌（*Nitobacter sp.*）是培养系统中的主要硝化菌，亚硝酸菌能氧化氨，生成亚硝酸盐（反应式2），硝化菌氧化亚硝酸盐，生成硝酸盐（反应式3），这二种反应使自由能下降。反应式2和3的意义在于把毒性氨转化为硝酸盐。



$$\Delta G^\circ = -59.4 \text{ kcal}$$



$$\Delta G^\circ = -18.0 \text{ kcal}$$

生物过滤的第三阶段即最后阶段为脱氮作用。Vaccaro（1965）将这一过程规定为硝酸盐或亚硝酸盐通过生物还原转化为氧化二氮或游离氮（图1）。显然，脱氮作用可以由异养和自养细菌进行，在有氧或无氧条件下都能产生。Kawai等人（1964）发现，海水中约有一半的厌氧菌能还原硝酸盐。

当脱氮作用从有机源取得氢时就表现出自由能的下降（反应式4），但如果反应是以单纯的电离作用进行，就没有能量损失（反应式5），4及5反应似乎都会在滤床上发生。

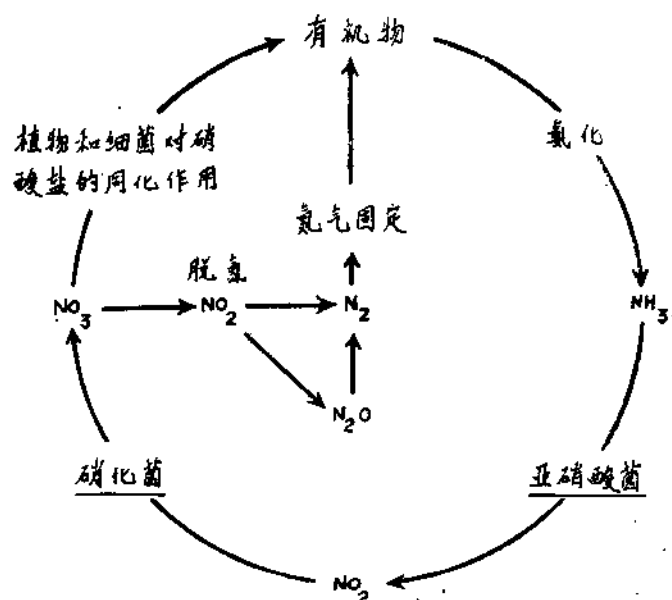
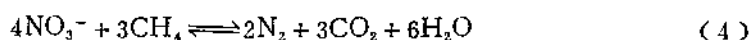
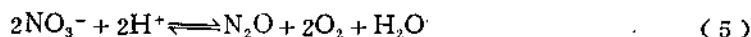


图 1. 氮循环



$$\Delta G^\circ = -475 \text{ kcal}$$



$$\Delta G^\circ = +21 \text{ kcal}$$

在陈旧的饲养水体中，亚硝酸盐长期维持低水平，同时硝酸盐含量也降低，脱氮作用显然存在。

矿化作用、硝化作用和脱氮作用均为氮循环中的组成部分。在自然界和饲养系统中，它们的机制是相同的，但效果不同。野生动物在自然界的散栖是作为克服环境压力的手段，这在有限的饲养系统中不可能有；饲养的动物受有限环境的支配，它们的生命依赖着上述生物转化的速率。

2. 滤床的管理

(1) 盐度：

ZoBell和Michener (1938) 研究了细菌本身是否就分海水种和淡水种这一问题，他们发现，大多数海水菌也能在淡水中生长，许多甚至在直接更换海水时也能活着。此外，12种表面看来是“海洋”细菌，当用淡水以5%的增量逐渐稀释海水时都可成功地转入淡水。

硝化菌是属于那些无适应急速变化能力的菌。Kawai等人 (1965) 发现，在正常盐度的海水中，海洋系统的硝化活力最大。当稀释或浓缩时，硝化作用减低，甚至把盐度加浓一倍，仍可有某些活动。

淡水中的硝化作用，在未加氯化钠之前最强，加到海水的正常浓度时，淡水系统的硝化作用就完全消失。

Kuhl和Mann (1962) 指出，硝化作用在淡水系统中比在海水系统中进行得快，在海水中生成的亚硝酸盐和硝酸盐的量较大。Kawai等人 (1964) 也证实了这一现象，如图2。

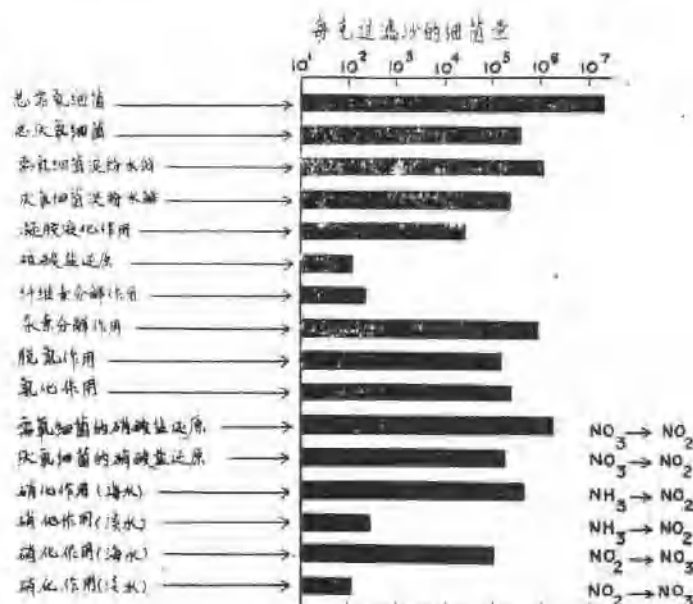


图2 在小型淡水和海水系统中经134天后的滤床细菌的数量。

滤床中的细菌能适应盐度的逐渐变化，不能适应急速的变化。当盐度变化迅速时，许多细菌死去，残存细菌的代谢作用也一时受到抑制，那些仍活着的细菌需要一段时间才能适应新的环境。在此期间，氨就增多，在大多数的情况下需数日才能达到完全适应，这时，氨的增加正达到足以使这系统中的动物中毒的程度。

在海水系统中，因表面蒸发，盐度逐渐增大，待盐度增长过大再加入所需水是不恰当的。如用比重来测量介质密度，对于海水，其标准值为1.025 (见第六章1)，值的偏差不允许超过 ± 0.002 。

在咸淡水系统中要保持盐度不变更为困难。应另外用容器冲稀海水，每次加少量的水。在加多量水之前必须使全系统有充分的混合。单独混合所需水可使错误发生仅限于容器中，全系统不致冒平衡破坏之险。这样稀释海水能使已稀释介质的盐度变化可能性降低到最小。

淡水和海水的补足水都应取用陈化自来水，所谓陈化自来水就是把自来水放在露天无盖的容器中至少三天，通入空气以赶出氯气。

(2) 砂砾表面：

Kawai 等人 (1964) 测得, 滤床中的硝化菌为悬浮在水中的硝化菌之100 倍, 这说明硝化作用的一个重要因素是可供细菌附着表面的数量。在一个培养系统中最大的表面积是由砂粒提供的。

不断积累的碎屑提供了更多的附着面同时促进了硝化作用 也经证实, 根据 Saeki (1958) 的研究, 在培养系统中附着在碎屑微粒上的细菌所进行的硝化占总硝化的25%, 在Kawai等人 (1965) 的试验中, 从陈旧的海水系统中取出一克表层砂, 放在干净海水中轻轻冲洗后, 这时砂的硝化能力失去40%, 继续洗就损失更多, 用力冲洗另一克砂时, 硝化能力失去66%, 作第二次冲洗时又失去14%, 这些发现说明二件事: 一、占总量相当大的一部分硝化菌是附着在碎屑上的。二、用力冲洗能把余下的细菌从砂砾表面剥离。

滤床中的硝化作用绝大部出现在砂砾上层, Kawai等人 (1965) 发现, 在海水系统中的滤器表层, 每一克砂有 10^5 氮的氧化菌, 同时发现, 亚硝酸盐的氧化菌量为 10^6 , 而在仅只5 厘米的深度下, 每种类型的量就减少90%。

既然, 滤床中的生物活动绝大部集中在上层, 因此, 设计培养系统时, 应注意滤床的表面积, 而不是水容量。譬如, 系统A: 长2 呎, 宽2 呎, 深4 呎, 系统B: 长4呎, 宽2呎, 深2呎; 两系统都有砂砾下的滤板, 每一滤床面积与各个系统相当, 两个系统容水量相等, 而系统B 能承担较大的动物负荷, 因为它的滤床表面面积大一倍。

砂砾颗粒大小很重要, 小砂砾具有的细菌附着面多于相同重量的大粒砂砾。例如, 各重1盎司的6个立方体有36个单位面积, 然而重6盎司的一个立方体只有6个面, 每个面大于小立方体的各个面。各重1盎司的6个立方体的总面积为重6 盎司的一个立方体面积的3.3倍。

但, 砂砾太小时会阻碍通过滤床的循环。因为逐渐积累的碎屑覆盖在滤床表面上, 形成垂直的通道, 水将沿着这些阻力小的通道流动, 结果引起不规则的充氧, 出现缺氧区, 抑制了需氧细菌在这里的生长。因此用沙或很细小的砂砾都不利, 特别不适用于深的滤床。对于大多数系统, 砂砾大小以2~5毫米为宜 (Saeki, 1958)。

砂砾形状也很重要。有棱角的砂砾的表面积大于圆形的。就同等单位容积来说, 一个球体的表面面积比其他任何几何体的表面面积都小。因此粗糙的、有棱角的砂砾优于光滑的和经水磨光的砂砾。

滤床是个长期使用的设备, 不能把砂砾从系统中取出冲洗。冲洗能洗掉绝大部分负载着大量硝化菌体的碎屑, 同时能使菌从砂砾表面脱落。在需要冲洗砂砾的场合下, 应该用相同盐度的干净水直接在设备中进行。在海水系统中应该用于净的海水。在咸淡水和淡水系统中应该各用干净的咸淡水和陈化的自来水。

(3) 充氧作用:

滤床好比是个巨大的呼吸器官, 在正常作用时需消耗一定的氧, 在滤床中微生物的氧消耗称为生物耗氧量。在过滤中生物耗氧量用过滤时的氧消耗量来衡量。

过滤时的氧消耗部分地反映了硝化作用的情况。Hirayama (1965) 指出, 如果一个滤床的生物耗氧量很高, 那就是相当大的硝化菌群体在作用。Hirayama 用取自使用已久的滤床上的沙做成砂柱来过滤培养用海水, 水在进入沙柱之前所含的溶解氧为6.48

毫克/升，在通过长48厘米的沙柱后测得之含量为5.26毫克/升，这时氨从238降到140毫克当量/升，亚硝酸盐从183降到112毫克当量/升。

滤床上有需氧和厌氧二种菌。在充气良好的系统中，需氧菌占优势。Kawai 等人（1965）证实，氧张力高时，硝化作用效力大。虽然在很低的氧张力下也含有氨和亚硝酸盐的若干转化。特别在淡水系统中是如此，亚硝酸盐加速氧化为硝酸盐；相反，海水系统在低的氧张力下效力较小。

氧的出现使厌氧菌受到抑制，所以滤床上的适当循环也使它们处于抑制状态，当系统中的氧张力降低时，厌氧菌增生。它们的代谢物很多是有毒的。

氨化和脱氨基作用在绝氧状态下都能发生，但其机制和最终产物不同。在绝氧场合下其机制是发酵，而不是氧化。氨化作用的结果生成有机酸，而不是碱，以及二氧化碳和氨。这些物质加上硫化氢、甲烷和其他等使窒息的滤床发出腐烂味。

运转率，即水流经系统的速度，对于容量在200加仑以上的系统不能低于1加仑/平方呎/分。在正常培养条件下，这一速度使氧保持在近饱和状。在容量小于200加仑的系统中，1加仑/平方呎/分的运转率太高。在这些系统中应把速度调节到用最小的表面搅动就能使溶解氧接近饱和（见第九章、4.）。

采用空气升液泵是使水在生物滤器中循环的最可靠方法。

空气升液泵和机械泵相比，有如下优点：

①兴建成本低，②维修少（无动件），③安装简便，④携带轻便，⑤无堵塞现象，⑥占地小，⑦结构简单，⑧易于制造，⑨在扬程低和没水深的场合操作，效率高于离心泵，⑩流速易调节，⑪可作多种用途。

空气升液管实际上是一根长的竖管，使用时，管的一部分是在砂砾下的滤板之下，其他部分是在滤板之上，其中一部分露在水平面之上，如图3。

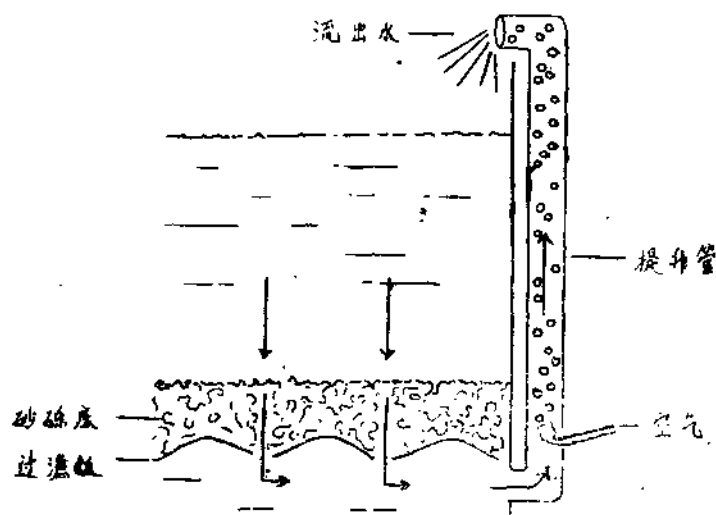


图3 用空气升液法经过砂砾下的滤板的水循环。

当管子垂直地浸没在水中时，管内、外的水位平衡。因空气轻于水，当空气从管下端注入管内时，形成气泡并上升。气泡上升时生成气和水的混合体，它仍轻于水。管内的气、水混合体轻于管外的水，水位平衡破坏，这时水从滤板下的管端流入管内。只要有空气注入，就不会达到平衡，气、水混合体从管顶部流出。

影响空气升液效力的主要因素是提升管的百分浸没率。操作空气升液管所需的空气量随百分浸没率的减小而增大。浸没率为100%时达最大效力。

百分浸没率计算简单。如图4假设空气进入口和流口水口之间的距离（A→C）为3呎，总提升（A→B）为1呎，得到：

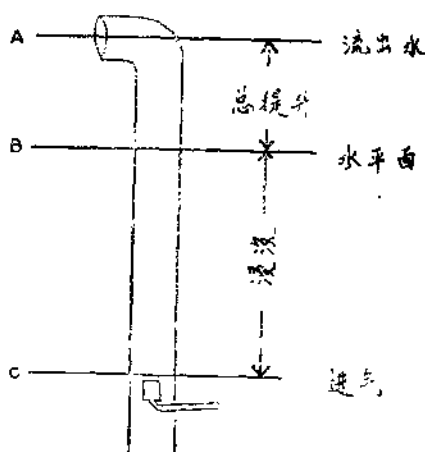


图4. 空气升液管的操作原理。

$$\frac{3\text{呎} - 1\text{呎}}{3\text{呎}} = 66\% \text{ (浸没率)}$$

关于区分浸没率，负载量和流速，提升管直径和侧面进空气的空气管直径之间的关系列于表1，一般提升管直径加1倍，容量增5.6倍。

当注入的空气量超过提升管的负载量时，空气升液管的效力降低。这个失效现象很易察觉，可从空气自顶端冒出的喀喀声来判断。这时减小压缩机气流即可。出来的水流应是均匀、等速的。如果出现喷流时，其原因一般是由于下列二种原因之一造成的；或者是对提升管的直径来讲空气量过大，大量空气直接由水中向大气中喷出，或者是提升管的百分浸没率不够大。

如果注入提升管的空气是分散的，则效力更大。在提升管直径等于或小于1吋的小系统中，采用一块浮石就能使空气分散。提升管较大时，用聚氯乙烯多孔管做成的分散气体管插在位于提升管内的空气管注气口。

表1 应用侧面空气进入法在各种条件下的空气升液管负载量

管 道 尺 寸		提 升 量 加伦/分			
出水管尺寸(吋)	空气管尺寸	70%浸没率	60%浸没率	50%浸没率	40%浸没率
1	$\frac{3}{8}$	10—17	8—12	7—11	6—10
$1\frac{1}{4}$	$\frac{3}{8}$	16—24	11—18	10—15	8—12
$1\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	20—36	16—28	12—21	10—19
2	$\frac{3}{4}$	33—65	26—55	20—40	18—35
$2\frac{1}{2}$	1	60—109	50—85	36—60	32—55
3	1	90—130	78—120	55—100	50—95
$3\frac{1}{2}$	1	120—250	110—180	90—150	80—130
4	$1\frac{1}{4}$	200—325	160—250	130—200	120—180
$4\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	250—475	200—375	170—275	155—225
5	$1\frac{1}{2}$	300—600	275—475	200—375	180—300
6	2	500—900	450—775	350—575	280—500

在培养系统中采用的空气升液管主要有二种类型：中心空气管（空气管在提升管内）和侧面进气管（空气管在提升管外）。图5表示每一种类型的两个不同装置。砂砾下的滤器由一个多孔板构成，使砂砾床悬空在池底上。它和空气升液泵结合使用，到目前还没有任何方法能超过用这种滤床进行生物过滤的效率。

采用砂砾过滤法，流经砂砾柱的其输送效率高而简便。空气提升管把动物呼吸和过滤时的氧消耗所产生的脱氧水从滤板下吸入管内，流回培养系统液面，再次氧化，如图3所示。

一个有效的砂砾滤板必须把池底完全盖死，同时与池壁相接触的边和所有角须加以密封。良好的密封具有二重作用，第一，它能消除在砂砾中可能增生厌氧细菌并生成有毒物质的死区（仅盖住部分池底的滤板因此不适用）；第二，它能防止砂砾滑到板下，消除了水流入空气升液管的障碍。砂砾下的滤板是一个隔离砂砾底与池底的假底，也只有形成这样的假底才能发生效力。

滤板要结实，在砂砾重力下不能倒坍。市场出售的板大多数是肋骨加固的，宜用于小型系统。对于较大的系统必须订制。任何惰性材料都可用做板的支座，如涂有玻璃树脂或环氧漆的砖。板本身也必须用惰性材料制作，不能用金属，最好用纤维玻璃，因为它是惰性材料，不腐蚀、结实、价廉、易于加工。

对于大型系统，最好用制成品来做板以降低成本。较好的一种材料是盖屋顶用的波

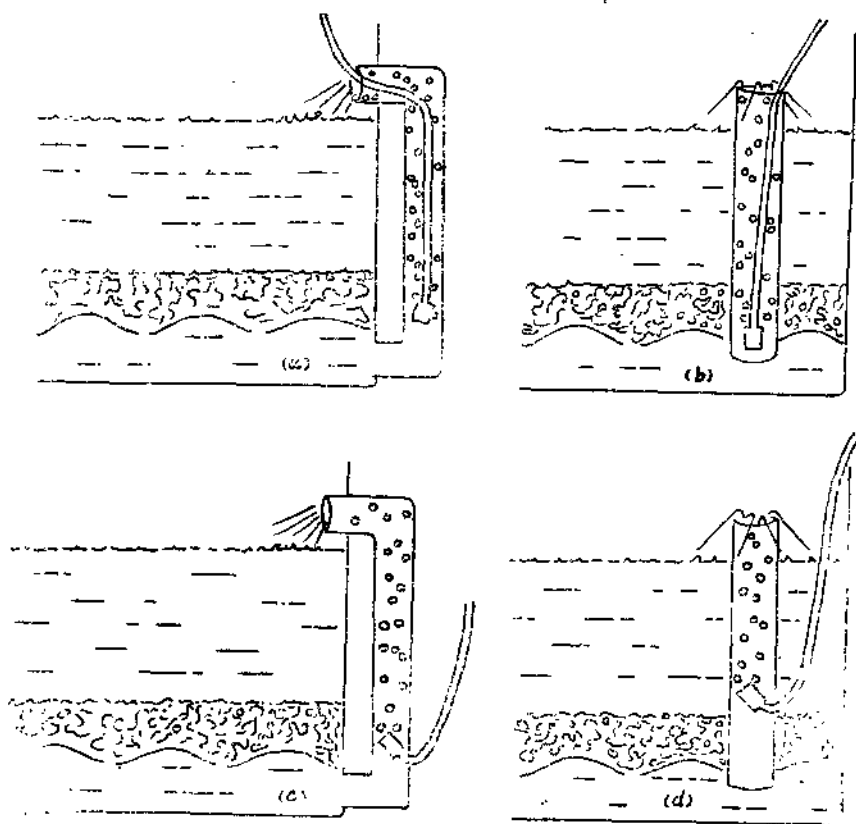


图5 培养系统中常用的二种中心空气管(a,b)和侧面进气管(c,d)。

纹纤维玻璃板，可从木器厂或建筑材料供应公司购买。这种板的尺寸一般为2呎×8呎。纤维玻璃板穿孔的最好办法是放在带有切玻璃丝刀片的锯机上加工，刀片与波纹相垂直。每个切缝的间距约为1吋。只需在板的一面波脊上开缝，另一面的波脊保持原样。水将自由地沿着这些波纹的斜面流经波纹凹槽中的切缝，如图3。如果没有锯机时，可用小钻头和电动手钻来钻孔。孔的间距约1吋。

板上的孔应小于砂砾，以免砂砾漏下板去。板应能紧密的装在池中，这样可减小边缘密封层的费用，板放置在支架上时切缝应在下方，并用水平器检查一下，板各部与池底应成等距。

最有效的密封层是通用电气公司或道氏科尼公司的建筑级硅密封膏（General Electric or Dow Corning construction grade silicone sealant）。用填隙枪沿着板和池壁间的接缝填封。如果缝隙很大，可用纤维玻璃带在滤板和池壁间填封。玻璃带的边缘必须涂敷密封膏。

在加砂砾和水之前,制好的滤板至少应搁置24小时。因为水能妨碍密封膏的干燥,而且砂砾的重量能破坏边缘的密封。

(4) pH:

Kawai 等人 (1965) 发现,如 pH 低于 9.0 时,对海水系统硝化作用的坏影响大于淡水系统,他们认为,这是由于淡水中的 pH 值一般较低。

Saeki (1958) 测得,在淡水系统中氨的转化受到低 pH 值的抑制,理想的 pH 值为 7.8; pH 值在 7.1 时,亚硝酸盐的转化最快,他认为,在淡水培养液中 pH 值以 7.1~7.8 的范围为宜。

在海水系统中,硝化作用的适宜 pH 范围为 7.5~8.3。

(5) 温度:

Bedford (1933) 发现,海水中大多数细菌生长的温度范围是 -5° 到 37°C ,最适宜的生长温度出现在较高的范围内,这表明细菌可以忍受很大的温度变化而仍能进行生命活动。

ZoBell (1934) 发现,培养的种在温度 -2°C 时,虽然氧化速度大大地减少,但仍有硝化作用。经数星期后氧化作用又增强,看来,生物已适应了低温。

Kawai 等人 (1965) 发现:在海水系统中温度在 $30\sim 35^{\circ}\text{C}$ 时硝化效率最高。在淡水系统中,最宜温度为 30°C 。当两系统的温度下降时,抑制效应在淡水中小得多。

在培养系统中,选择的最适温度应根据动物的要求,滤床不受温度变化的影响。譬如,温度的突然下降对硝化菌无影响,仅仅是它们的代谢作用一时降低。如上所述,硝化作用的最适宜温度高于大多数水栖动物的容许极限。对于滤床的日常管理,温度不是重要的因素,对于培养的动物来说,则极为重要。

(6) 有毒添加剂:

许多无机和有机化合物,包括抗菌素,都能抑制硝化作用 (Tomlinson 等人, 1936), 甲醛水即使浓度很低也能妨害硝化作用 (Burrows 和 Combs, 1968)。当有毒物质加入培养系统中时,有两种抑制机制可能发生,或者是滤层生物的生长和增生受到抑制,或者是这种物质虽然对它们的生长和增生不影响,但是影响细胞的新陈代谢,使其不能发挥最大的氧化能力。由于细胞的适应力较大,所以测定某一化合物对硝化作用的影响很困难。此外培养液的化学复杂性更使得这种影响的测定复杂化。

凡能破坏滤床平衡的物质不应加入培养系统。如果有生病的动物需要治疗,应把它们取出放在别处作处理。为了去除动物的寄生物而中断生物过滤是没有好处的。因为用抗菌素或铜之类物质对饲养水作处理后,氨的上升量就足以杀死动物。

必须预防培养区受外界污染,例如,烟灰和杀虫剂都是有毒的,都可从空气中进入水中。

3. 负载量的测定

负载量是生物过滤的一个重要方面。负载量是指一个系统所能承受的动物负荷。

Hirayama (1966) 提出了以下公式来计算小型海水系统的负载量*

* 本公式也可能适用于淡水系统,但需验证。

$$\sum_{i=1}^p \frac{10W_i}{\frac{0.70}{V_i} + \frac{0.95 \times 10^3}{G_i D_i}} \geq \sum_{i=1}^q (B_i^{0.544} \times 10^{-2}) + 0.051F$$

左项为滤床的氧化能力（过滤时的氧消耗），测量单位用每分钟的毫克耗氧量。 W = 滤床表面面积（平方米）， V = 滤速（厘米/分）， D = 砂砾深度（厘米）， p = 系统中所使用的滤器个数。式中 G 表示砂砾的粒径系数，其计算式：

$$\frac{1}{R_1} X_1 + \frac{1}{R_2} X_2 + \frac{1}{R_3} X_3 + \dots + \frac{1}{R_n} X_n$$

R = 滤床中每部分砂砾的平均粒径（毫米）（如砂砾已分粒级）。 X = 每部分的百分重量。

方程右项为动物造成的“污染”速度，也用毫克/分氧来表示。在这项中， B = 各条鱼的体重（克）， F = 每天加入系统中的食物量（克）， q = 系统中的鱼数。

从公式中看出，滤床的氧化能力必须大于或等于被动物造成的“污染”速率。也须注意，各动物的体重减小时，系统中的负载量也随之减小。换言之，负载量不单是动物总体重的函数。一个系统能负担一条10磅重的鱼不一定就能负担各重1磅的10条鱼。让我们假设，譬如在只有一个滤器的假定系统中， $W = 0.35$ 平方米， $V = 10.5$ 厘米/分， $D = 36$ 厘米，如果砂砾为同一粒级， $R = 4$ 毫米，那么 $\dot{G} = \frac{1}{4} \times 100$ 或 25。

把这些值代入方程左项，得到过滤时的氧消耗为：

$$\begin{aligned} \frac{10(0.35)}{\frac{0.70}{10.5} + \frac{0.95 \times 10^3}{25(36)}} &= \frac{3.5}{0.07 \times \frac{950}{900}} \\ &= \frac{3.5}{0.037 + 1.055} = \frac{3.5}{1.122} \\ &= 3.2 \text{ 毫克/分} \end{aligned}$$

让我们进一步假设，如果在系统中只有一条要培养的鱼，同时没有喂食。看方程右项， X 表示过滤时的氧消耗，

$$X = \sum_{i=1}^q (B_i^{0.544} \times 10^{-2}) + 0.051F$$

在这个特殊情况下， $q = 1$ ，因没有给鱼喂食，略去方程中的 F 。这样，这一系统所能负担的唯一的一条鱼的最大重量 B 如下：

$$\begin{aligned} 3.2 &\approx B^{0.544} \times 10^{-2} \\ B &\approx 40,700 \text{ 克} \end{aligned}$$

也就是，约90磅的一条鱼。现在再假设，在同一系统中有几条各重1磅的鱼，也不喂食。这时，在同一系统中所能负担的各重1磅的鱼的 maximum 数量 q 为：

$$\begin{aligned} 3.2 &= q(454^{0.544} \times 10^{-2}) \\ q &\approx 11.5 \end{aligned}$$

也就是，约为11条各重1磅的鱼。

如果每天喂食，负载量则更小。假设，每条1磅的鱼每日喂食6克，那么负载的最大鱼数为：

$$3.2 = q(454^{0.544} \times 10^{-2}) + 0.051(6q)$$

$$q \approx 5.45.$$

也就是，约5条1磅的鱼。

4. 调整系统

所谓调整系统，就是在这个系统中滤器上的细菌和其能量来源的经常供应处于动态平衡的状态*。

硝化作用可作为衡量一个新建系统是否已具备使用条件的尺度。最初，颇高的氨量是主要的限制因素。通常，氨在暖水条件下（环境温度等于或高于15℃）二星期内便逐渐降低，在冷水中（环境温度低于15℃）时间则稍长一些。

虽然，一个系统在二星期后可以完成培养条件的准备，但还没具备所有的条件，因为许多重要菌体这时还没有稳定。Kawai 等人（1964）对细菌群体在暖海水系统中三个月后的情况作了如下的描述（其结果列于图2）。

（1）总需氧菌：当鱼放入系统后总需氧菌在二星期内增长十倍，二星期后的最大群体密度达每克滤砂 10^8 个，三个月后群体稳定在每克滤砂 10^7 的密度。

（2）蛋白质分解：开始时菌群体为每克滤砂 10^3 ，四星期后增加100倍。三个月后群体稳定在 10^4 的密度。这一引人注目的增量是由于蛋白质含量高的食物（鱼肉）所引起。

（3）淀粉分解：最初的群体占细菌总数的10%，然后逐渐增长，四星期后开始下降，三个月后达稳定，为细菌总数的1%。

（4）硝化菌：

亚硝酸菌的密度在四星期后达最大值，硝酸菌在八星期后达最大值。二星期后，亚硝酸菌的数量超过硝酸菌。在每克滤砂含量分别为 10^6 和 10^6 时稳定。

在硝化作用开始阶段，氨的下降和亚硝酸盐的氧化不是同时发生，因硝化菌的生长由于氨的出现而被抑制（Lees, 1952）。在大部分氨被亚硝酸菌转化之前不会发生亚硝酸盐的有效氧化。

在新建系统中，开始时由于异养和自养菌之间的数量不平衡，出现较高的氨量。当一个系统开始使用后，异养菌的生长起初超过自养菌。大部分从氨化和脱氨基过程生成的氨被部分异养菌消耗。换言之，在消耗氨方面，异养菌和自养菌之间无明显的界线，因为很多异养菌也把它作为一种能源。当异养菌群体减少并稳定后才出现硝化菌氧化氨的作用（Quastel 和 Scholefield, 1951）。

在一个新建系统中，菌群体稳定之前，菌的数量是很重要的因子。随后各细胞代谢活力的增强补偿了能源的变化，细胞数量不再增加。从 Quastel 和 Scholefield 的实验（1951）表明，在既定大小的表面上，硝化菌群体的密度相当稳定，它们与有效能源的数量无关。

* 这里所用“调整的”一词不应与它的旧含义混为一谈。那是指培养水体未通入空气，但动物寿命却随着水的陈化具有制菌的性质。而显著延长。

在调整系统中, 菌群体的总氧化能力要与每日固定加入的可氧化作用物相配合, 当动物数量、动物体重和每日食物进料量骤然增加时, 常常引起氨和亚硝酸盐的显著上升。上升量一直持续到细菌与新状态达平衡为止。

氨和亚硝酸盐的增长程度取决于添加在系统中的负荷量。如果加入的动物和食物量仍低于最大负载量, 这时新状态下的平衡在暖水条件下三天以内就可出现, 在冷水条件下时间略增长。如果加入的负荷量超过系统的最大负载能力, 其结果, 氨和亚硝酸盐将永久升高。

在一个新系统中, 氨化、脱氨基、硝化和脱氮几乎是按顺序地一个接一个的进行, 但在已调整好的系统中, 它们将同时发生。在调整的系统氨(总 NH_4^+) 小于 0.1 ppm 。可测得的亚硝酸盐是脱氮作用的结果。这些量都是稳定的, 这些转化过程也没有时间先后, 因为所有能源都是同时氧化。

在调整一个系统时, 最好作超量补偿, 也就是采用略超过它最后要负载的动物负荷。超量补偿能完全消除以后的氨增量。

调整任一系统时只能用耐性强的动物。在硝化作用还没有完全稳固之前不能加入对氨毒极敏感的动物。龟是调整新系统的理想动物, 它们受氨的影响比鱼类和无脊椎动物都小, 而且能不断地供给生物过滤开始阶段所需要的有机物。海龟和咸水龟 (diamond-back terapins)* 都适用于调节海水系统, 任何一种常见的淡水种, 如食用甲鱼 (Slider), 齿龟 (Snapper), 和图纹龟 (Map turtle) 都是调节淡水的理想动物, 在鱼类中, 如鳊鱼科的鳊、鲈科鱼、鲤鱼和多种鲶鱼都有显著的耐氨力。

一次加少量动物是个好措施, 如果没有耐性强的动物, 而且培养的种类对氨毒又很敏感, 这时动物负荷可以逐渐增大到最大密度。譬如, 在必须始终保持氨量小于 0.2 ppm 的情况下, 动物数量应以低于这个量级的速度缓慢增加。办法是不断地测定氨量, 同时不使加入的动物量超过硝化菌群在 0.2 ppm 或更少时能维持稳定的能力。这个方法需要大量实验室工作, 并且延长调整时间。第一种方法用耐性强的动物作超量补偿, 较快而实用。

在冷水中, 时间需要稍长, 原因是细菌在低温下生长较慢。为了加速这一过程, 可用暖水动物将系统维持在暖水温度, 一直到硝化反应建成为止, 然后取出暖水动物, 等温度下降后, 加入类似重量 (宁可偏低) 的冷水动物。暖水动物取出后, 下降温度多快没有什么关系。在加入冷水动物后, 常常能察觉到氨和亚硝酸盐有增加, 即使在已作超量补偿的系统中也有此种现象。三天后便下降, 这说明, 细菌已适应冷的环境。所以在增加冷水动物之前可先让细菌在低温下适应 48 小时, 使这些增量减至最小。

加速调整过程的唯一可靠的方法是, 把已调整好的系统内的表层砂砾加在新滤床的表面。部分碎屑也应包括在内, 因为它含有大量的细菌。

5. 碎屑形成的机制

上面已叙及碎屑在硝化中的作用。在封闭的培养系统中, 碎屑就是累积在培养系统中的松散积聚物。一般是集中在滤床砂砾上。当系统中的循环较弱时, 也会出现在静止的物体上。从生化角度看, 它的组成极复杂, 目前还未确定。它由有机和无机两种物质

* 美国沿大西洋海滨之咸水龟。

构成，在它的形成中，异养细菌有重要作用。只要饲养水中有活的生物和溶解的有机物存在，就会有碎屑的形成。去除它的方法在下章中讨论。

水中的气泡在碎屑形成中有重要意义，Baylor 和 Sutcliffe (1963) 证实，由于气泡吸附介质中的有机物，在气泡上形成了有机积聚物。Riley (1963) 和 Sutcliffe 等人 (1963) 用空气泡通入过滤海水的方法使积聚物形成。积聚物的形成意味着溶液中的溶解有机物被提取了。

碎屑积聚物在形成后继续增大其体积，这里有二种形成机制：凝集作用和继续吸附 (Riley, 1963)。在培养系统中，在滤床的表面上，凝集作用可能是主要的因素，因为这里的碎屑物质很密集。开始，积聚物粘附在砂粒上。它们越集越多，砂砾间的空隙也被填满，同时由于静电引力使它们互相也粘附在一起。最后增长到肉眼能看得见的体积。

形成碎屑积聚物的第二个因素——继续吸附——在气水交界面上很重要，特别是在系统上的水流入处，这里表面的搅动最剧烈。在空气升液管内它也很重要，因为分散的微小气泡增多了吸附有机物的气泡面。Barber (1966) 认为，在自然情况下积聚物是在水表面形成的……。在一个物理过程中，有机分子从溶液中分离出来在上升气泡外面形成一个有机薄膜。在海面上气泡逸入大气中时，把薄膜留在海中成为一个泄了气的单分子膜，然后沉入水层，形成了供溶解物质继续积聚的核心。

在封闭系统中有类似过程，Carlucci 和 Williams (1965) 表明，把气泡通入海水，在它产生的泡沫中有浓集的细菌。所以气提所形成的泡沫也可能含有大量的细菌 (见第三章3.)，采用臭氧的场合例外。在水柱中新生成的积聚物迅速获得菌群。积聚物给它们提供了能源和附着面，特别是在菌群体稠密的地方，如滤床。这也说明了 Kawai 等人 (1965) 的发现，就是当碎屑冲洗掉后滤砂的硝化能力显著地下降。

Sieburth (1965) 发现，即使无气泡，自然界的海水菌群体在脱氨和氨化过程中也能形成碎屑。他提出了在碎屑形成时有机和无机物合并的可能机制。根据 Barber (1966) 的研究，Sieburth 推断，在氨排出过程中出现的微小碱化区能使无机核沉淀，在它的周围可以形成有机积聚物。

碎屑本质上是无害的，但当它堆积稠密时，也能产生如下章所述的其他问题。积聚物已不是溶解的物质，因此就难于被动物吸收利用。溶解物质一旦从溶液中提出而沉积在碎屑上时，它的毒性就大为减低。用活性炭作化学过滤实际上就是利用的这一原理 (见第三章2节)，碳孔中吸附的物质在溶液中消失，因此动物就无法取用。

碎屑的形成机制提供了喂养微小幼虫的可取方法，Baylor 和 Sutcliffe (1963) 证实，卤虫可以用在气泡通过海水后形成的积聚物培养，他们的发现有着潜在的意义。例如在给幼虫喂食前，可把营养液分散倒入空气柱中，营养物在空气柱中将部份地聚集成动物可以利用的东西。当营养水经过动物循环一定时间后，再恢复正常水流，多余的物质可用化学过滤法清除掉。

第二章 机械过滤

1. 定义和作用

机械过滤就是用物理办法把悬浮的微小物质和循环水分离。办法就是使循环水通过适当的实体或隔膜把微小物质滤除，滤除的微粒再根据滤器的型式用不同的办法除去。

机械过滤对封闭系统养殖有三重作用：（1）降低水中由于悬浮的微小生物体和微粒所造成的浊度，（2）减少水中有机胶体量，（3）除去聚积在生物滤床上的碎屑。机械过滤也可以用作天然水的预先过滤，因而它能够降低浊度并且除去大量的微生物，这些微生物如果不除去，就有增加生物的氧需要量或引起生物流行病的危险。

2. 砂砾机械过滤的机制

砂砾无论在生物滤器或快速沙滤器中都可以滤除悬浮的微小物质，从而降低水的浊度。滤除的机制有二：（1）悬浮物质陷于砂粒间隙之间；（2）砂粒的静电荷面把电荷相反的悬浮物质或胶体吸住，因而也就使它们从溶液中分离出来。这种办法的有限程度取决于下述各因素。

（1）砂砾大小：

砂砾机械过滤的有效程度和各个砂粒的大小有关：砂粒愈小，有效程度愈高。这是因为小的颗粒有更多的表面以便吸住更多的悬浮物质或胶体；而且颗粒之间小的间隙也可以陷留住更细的物体；这样，单位体积过滤水内悬浮物的滤除百分率就较高了。

（2）碎屑的聚积：

碎屑的聚积可以缩小砂粒之间的间隙，因而也就能够陷留住更细微的悬浮物。所以旧的滤床滤过的水更清，原因就在于此。

（3）砂砾的形状：

粗糙、带有棱角的砂砾最适宜于机械过滤，因为它们的面多，能够增大滤床的静电位。不规则的砂粒还可以减少连串间隙的出现，这样在生物滤器中就可以阻止碎屑堕入深层而难以用一般清除方法除掉。

（4）砂砾的分级：

在没有反冲装置的空气升液生物滤器中，只要有一级的砂砾就够了。大小不同的砂粒混在一起就会减少接触面；大砂粒之间就会形成大的空隙，碎屑也就会通过这些大空隙而堕入深层；如果滤床浅时，它们就会畅通无阻而在培养系统中循环不已。

但快速沙滤器中的砂砾是有意识地把它分级的，因而它的底层也能进行过滤。

（5）砂砾的均匀分布：

水在砂砾中的流程取决于滤床中各个局部的阻力。水在生物滤器中的流程，如果滤板上的砂砾分布不均匀，就会受到歪曲。滤床薄的部份比滤床厚的部份阻力小，循环水通过量就较大。这种情况可以造成象在不分级的滤床系统中所常见的那种长期浑浊情况。