

废水生物除磷微生物学的研究进展

周岳溪* 钱 易 顾夏声

(清华大学环境工程系, 北京 100084)

生物除磷是一项新型的废水处理技术。近年来,对它进行了较广泛的研究。在工艺方面,相继开发了不同工艺流程。这些工艺都能有效地进行脱氮除磷的同时去除有机污染物,从而达到一箭三雕的效果,为防治水体富营养化提供了一条经济、有效的途径。在机理研究方面,目前已基本弄清了生物脱氮原理,但除磷机理的研究尚处于初始阶段,许多问题没有解决,因而导致实际生物除磷过程难于控制。因此,了解处理系统活性污泥的微生物相组成,进而探索不同微生物的磷代谢生理特性及生化机理,对于改善工艺运行尤为重要。

鉴于国外对废水生物除磷机理研究做过相当多的工作,而我国尚未见系统的研究报道,本文扼要介绍国内外的研究进展。

(一) 生物除磷活性污泥的微生物组成

1975 年, Fuhs 和 Chen^[1]首次研究了废水生物除磷微生物学。他们考察了 Back River

和 Seneca Falls 废水处理厂曝气池内活性污泥的微生物相组成,并认为生物除磷的原理是,通过活性污泥中的不动杆菌属的磷代谢作用。即在厌氧条件下释放磷后,在后续好氧条件下过量摄取磷。

1983 年, Buchan^[2]考察了除磷效果良好的几种试验装置和南非几座污水生物除磷处理厂的曝气池活性污泥微生物组成(表 1)。结果表明,不动杆菌 (*Acinetobacter* sp.) 的确是其优势菌种。

Buchan 认为,废水生物除磷过程首先是富集不动杆菌属,然后通过该菌的磷代谢达到除磷目的。

然而, 1983 年, Brodisch 和 Joyner^[3]报道,在其试验装置(出水中的 $PO_4\text{-P}$ 浓度均小于 0.2mg/l) 的活性污泥微生物组成中,不动

* 现通信地址: 北京, 中国环境科学研究院 100012

表 1 生物除磷装置中活性污泥中各种异养型革兰氏阴性菌的百分含量

百分比 菌 种	厂 名	Goudkoppies	Norther 1	Capetoum	Brits
不动杆菌属 (<i>Acinetobacter</i> sp.)		53.6	48.0	66.2	62.8
巴斯德杆菌属 (<i>Pasteurella</i>)		1.2	—	1.4	—
产碱菌属 (<i>Alcaligenes</i>)		11.9	6.0	—	24.5
亲水型气单胞菌 (<i>Aeromonas hydrophila</i>)		10.7	6.0	2.8	2.1
假单胞菌属 (<i>Pseudomonas</i> sp.)		9.5	7.0	19.8	4.3
黄杆菌属 (<i>Flavobacterium</i>)		5.9	31.0	—	—
大肠杆菌 (<i>E. coli</i>)		1.2	—	—	—
其 它		4.8	2.0	8.4	4.2
未鉴定		1.2	—	1.4	2.1

杆菌只是少数菌之一,优势菌为气单胞菌属和假单胞菌(表 2)。他们认为,不动杆菌不是废水生物除磷系统中唯一能过量摄取磷的细菌,气单胞菌属、假单胞菌属、放线菌属(*Actinomyces*)和诺卡氏菌属(*Nocardia*)可能也能贮存聚磷酸盐。这一研究促使人们进一步探索不动杆菌属在废水生物除磷工艺中的作用。

表 2 中试装置各区污泥中的细菌组成①

细 菌	厌氧区 (%)	缺氧区 (%)	好氧区 (%)	回流污泥 (%)
革兰氏阴性菌	28	20	28	23
气单胞菌属	16	12	15	17
假单胞菌属	8	25	13	18
巴斯德杆菌属	11	20	6	9
产碱菌属	3	—	3	1
不动杆菌属	5	4	10	5
黄杆菌属	5	5	4	4
肠杆菌属 (<i>Enterobacter</i>)	7	2	5	5
大肠杆菌	1	—	—	4
沙雷氏菌属 (<i>Serratia</i>)	1	2	4	2
克雷伯氏菌属 (<i>Klebsiella</i>)	—	2	1	5
其他	15	8	11	7

① 五次鉴定结果平均值

1985 年, Meganck^[4] 报道,在 A²/O 工艺的试验装置运行正常时,活性污泥中优势菌种为假单胞菌,而不动杆菌属只是少数菌。

近年来,国内对除磷活性污泥的微生物相组成也进行了一些研究。1990 年,中国科学院考察了正常运行的 A/O 生物除磷工艺的各池的优势菌组成。结果表明其中没有不动杆菌属。

1987—1990 年,作者^[5]对废水生物除磷机理进行了研究,考察了间歇式生物除磷工艺在不同运行阶段其活性污泥中主要微生物的组成特性。结果发现,在污泥驯化后期,试验装置内的主要微生物数量分布为气单胞菌属-假单胞菌属-肠杆菌属,而没有发现不动杆菌属。当反应器处于稳定运行阶段时,活性污泥中的微生物组成发生了显著变化。主要微生物的数量分布顺序为:假单胞菌属-气单胞菌属-棒杆菌

属。不动杆菌属的数量极小。

国内外的研究结果表明,尽管不同形式的废水生物除磷处理工艺在其相应的工艺条件下运行时,均能达到良好的除磷效果,其活性污泥的微生物组成却存在着较大的差异,优势菌种也不完全一致。许多工艺的活性污泥中不动杆菌属数量很少。因此, Fuhs 和 Chen 等人^[1,2]认为“废水生物除磷系统的运行是为了富集不动杆菌属,以达到除磷效果”的观点是不全面的。

(二) 主要生物除磷微生物生理特性的研究

1. 不动杆菌属: Fuhs 和 Chen^[1]认为,生物除磷是靠不动杆菌属的磷代谢完成的。此后的研究证实,不动杆菌属的确是一类除磷微生物。1980 年, Deinema 等人^[7]以丁酸或戊酸为碳源,对不动杆菌进行纯种培养。结果发现,在其生长早期阶段,此菌能过量摄取培养基内的磷,于细胞内形成聚磷酸盐,其含量可达细菌干重的 10—20%。此外,不动杆菌还具有积累脂肪酸和聚- β -羟基丁酸盐的能力。1983 年, Buchan^[2]进行的纯种培养试验结果表明,不动杆菌过量积累的聚磷酸盐含量达细菌干重的 25%,而且其 Ca/P 之比在 0.1—0.36 之间。

但是,1985 年, Deinema 等人^[8]却发现,在代谢旺盛期,不动杆菌于厌氧条件下能降解其细胞内的聚磷酸盐释放出磷酸。而处于稳定生长期的“老龄”菌却没有这一特性。

生物除磷过程中,不同细菌之间存在着复杂关系,而纯种培养试验却不能反映这些关系,从而使结果具有一定的局限性。为此,1988 年, Cloete 和 Stryen^[9]研究了一种利用半透膜-免疫荧光组合的新方法,以直接计数、鉴定废水生物处理活性污泥中的不动杆菌。用这种方法测试了南非 Cape Town 北区废水生物除磷处理厂的活性污泥中的不动杆菌的数量和除磷能力。测试结果表明^[10],在曝气池内的所有细菌中,不动杆菌虽占 79.94—89.94%,但其实际的除磷能力只有 3.0—34.86%。因此,两者之间无直接联系。这进一步说明,在废水生物除磷

处理的活性污泥中,除了不动杆菌外,其它细菌也起着重要作用。

此外,1987 年, Comeau 等人^[11]提出了除磷菌的概念。所谓除磷菌,是指活性污泥中既能累积聚磷酸盐又能积累聚- β -羟基丁酸盐的细菌。因此,不动杆菌属是一类除磷菌。

2. 气单胞菌属: 气单胞菌也是除磷菌之一。Brodisch 和 Joyner^[3]发现,在活性污泥的整个细菌组成中,这类细菌占 12—36%,且在厌氧和缺氧区内所占比例有时比好氧区的高(表 2)。Brodisch^[12]、Meganck 和 Malnou 等^[4]研究了此类菌的生理学性能,主要结果为:

(1) 在废水除磷处理过程中,能够过量摄取废水中的磷形成聚磷酸盐内含物。但其主要作用是降解有机物,即在厌氧条件下,利用某些糖和醇为基质,代谢生成短链挥发性脂肪酸。

(2) 能进行反硝化。其中,嗜水性气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)可以使硝酸盐还原成亚硝酸盐,而其他的一些菌种则可以使硝酸盐直接还原成氮气。

3. 假单胞菌属: 1985 年, Suresh 等人^[13]通过纯种培养试验,考察了运转正常的厌氧/好氧(A/O)废水生物除磷处理系统曝气池内活性污泥中所分离的假单胞菌属的磷代谢性能。结果发现:

(1) 它们能够累积聚磷酸盐,其含量达细菌干重的 31%。

(2) 在好氧条件下,这类菌从对数生长期到稳定生长期时,聚磷酸盐含量也随培养时间的延长而增加。

(3) 在好氧条件下,这类菌在稳定生长前期的聚磷酸盐激酶的增长速率是对数生长期的 10 倍。然而,当该菌生长到稳定期的中后期,聚磷酸盐激酶的增加速率降低为对数生长期的 3 倍。这与细胞内的聚磷酸盐含量变化趋势恰恰相反,可见聚磷酸盐对聚磷酸盐激酶有抑制作用。

(4) 在整个处理系统的除磷过程中,这类菌起着重要作用。

最近,作者^[6]研究了自除磷效果良好的循

序间歇式废水生物除磷处理装置中的活性污泥中所分离的优势菌假单胞菌的磷代谢生理特性。试验结果表明:

(1) 假单胞菌具有除磷菌的共性——在厌氧/好氧培养过程中的厌氧阶段发生磷释放,转入好氧阶段后产生过量摄磷现象。

(2) 在过量摄磷过程中,其细胞外膜上诱导产生的磷酸专一性孔道蛋白起着重要作用。

(3) 在好氧条件下,以乙酸盐为基质培养时,向培养基内滴加酸,会导致胞内聚磷酸盐降解而释放磷。反之,向培养基内滴加碱,则导致产生过量摄磷现象,而加 NaOH 所引起的磷摄取量较 NaHCO₃ 的大。

以上为目前研究较多的几种主要的除磷菌。还有一些既能进行反硝化作用,又具有累积聚磷酸盐能力的细菌^[14,15,16],如: 肠杆菌属、放射土壤杆菌、枯草芽孢杆菌、节杆菌属、着色杆菌、棒杆菌属、脱氮微球菌、粘球菌属、链球菌属、迂回螺菌、氧化硫硫杆菌等等。此外,大肠杆菌、产气杆菌、氢单胞菌属、硝化杆菌属、亚硝化单胞菌属、诺卡氏菌属以及分枝杆菌属的细菌也能过量摄取废水中的磷于细胞内形成聚磷酸盐内含物。

事实上,上述许多细菌也存在于传统活性污泥处理系统中,而传统处理工艺之所以不能有效地除磷,可能是具体的环境条件不能诱导这些细菌产生过量摄磷作用。总的来说,目前对各类不同除磷菌的磷代谢特性尚缺乏研究。

(三) 今后的研究方向

1. 随着工艺流程、所处理的废水水质等条件变化,生物除磷是通过不同的微生物群的相互作用完成的。因此,分离、鉴定不同工艺在其处理效果正常条件下的活性污泥微生物相组成,然后研究其主要微生物的磷代谢特性及其影响因素,将是今后改进现有生物除磷处理工艺的一种有效途径。

2. 除磷处理系统的活性污泥中的许多除磷菌,也存在于一般的废水生物处理装置中。因此,研究这些微生物生理代谢特性,从而使现有

(下转封三)