

专论与综述

光合细菌在有机废水处理中的应用

刘 如 林

(南开大学生物系)

摘要 本文综述了国内外利用光合细菌处理有机废水的研究概况。高浓度有机废水已成为主要的水污染源。光合细菌处理法是一项新技术。复杂的有机物先经异养菌降解,生成低级脂肪酸等小分子物质,再由光合细菌降解。红螺菌科的一些菌在光照或黑暗、有氧或无氧条件下均能利用小分子有机物迅速增殖。废水 BOD 由 10000 mg/L 以上降至 1000mg/L 以下,使水质得以净化。作为副产物的菌体蛋白可以综合利用。

关键词 光合细菌;有机废水;处理。

光合细菌(PSB)是能进行光合作用的一类细菌,属于水圈微生物的一种,广泛分布于水田、池沼及江、河、湖、海中,尤其在有机物污染的积水处较多。该菌能利用光能进行光合作用而生长发育,但与高等植物和藻类有所不同,其光合作用仅限于厌氧光照条件下进行,并且不产生氧气^[1]。光合细菌包括绿硫细菌(*Chlorobiaceae*)、红硫细菌(*Chromatiaceae*)和红螺菌(*Rhodospirillaceae*)三个

药、禽畜饲料和鱼虾饵料等。因此,对于光合细菌的研究引起了世界上许多学者的注意^[2]。利用光合细菌处理有机废水,是近二十年来环境科学的一项新进展。

一、国内外研究概况

目前,高浓度有机废水已成为主要的水污染源,是环境保护领域中亟待解决的重点。而通常所用的活性污泥法又普遍存在占地面积大、维修管理复杂、基建及运转费用高等缺点,寻求先进实用的处理新技术是国内外均在大力追求的目标。

光合细菌用于高浓度有机废水的处理早已引起人们的高度重视。由于此工艺设备简单、耗能少、菌体能综合利用、不造成二次污染,在国外已得到初步应用。日本自六十年代起,小林正泰等首先开展了用 PSB 法处理有机废水的试验研究,先后成功地用光合细菌对粪尿、食品、淀粉、皮革、豆制品等废水进行处理,建立了一批日处理几十、几百乃至几千吨高浓度有机废水的大中型实用系统,有的已运转十多年,效果良好,充分显示了 PSB 法优于一般活性污泥法、具有重要开发利用价值等特点^[3]。据报道,南朝鲜在日本微生物资源研究所的协助下,在大邱市酒精厂建

表 1 几种单细胞蛋白成分比较

成 分	红色无硫细菌	单细胞蛋白(酵母)	单细胞蛋白(细菌)
蛋白质(%)	66	54	62—73
脂肪(%)	7	10	10—15
碳水化合物(%)	23	26	10
灰分(%)	4	7	6—12
维生素 B ₁ (μg/g)	12	2—20	11—13
维生素 B ₂ (μg/g)	50	30—60	110—130
维生素 B ₆ (μg/g)	5	40—50	4.8—7.6
维生素 B ₁₂ (μg/g)	21	—	0.11—0.17
烟酸 (μg/g)	125	200—500	165—200
泛酸 (μg/g)	30	30—200	11—23

科,前二者为光能自养菌,后者为光能异养菌。光合细菌在污水净化、改善植物营养和增进土壤肥力等方面均有重要作用;其细胞富含蛋白质和 B 族维生素(表 1),可用于制

成日处理 600 吨、BOD 高达 2—3 万 ppm 的大型处理场,1981 年投入运转。近年来,澳大利亚、美国等也相继进行了这方面的研究工作^[2]。

我国对此也作了不少工作,取得了一些成绩。中国科学院有关单位及部分高校曾对光合细菌进行多方面的基础理论研究,发表了不少论文;浙江轻工研究所在处理高浓度合成脂肪酸废水研究方面取得了成绩;辽宁环保研究所在肉类废水处理试验中也进展较快;上海交通大学生物技术研究所利用光合细菌对豆制品、洗毛、牛粪尿等废水进行处理;通过了小试技术鉴定,并在小林正泰帮助下与南通发酵厂合作,用 PSB 法成功地进行日处理 150 吨柠檬酸废水的研究,取得了中试成果。

二、光合细菌处理有机废水的机理

光合细菌之所以能在有机废水中起净化作用,是与其细胞结构和物质、能量的代谢分不开的。特别是红色非硫细菌科的一些种,多见于有机物污染的水中,其胞内具有能光合作用的载色体,它是由细胞膜分化而成的,直径约 600—1000 Å 的球状体或胞状体。载色体颗粒中密集地包含着细菌叶绿素和类胡萝卜素,进行着光合磷酸化反应和光氧化还原反应。在好氧条件下,胞内缺少这种载色体,但只要将其置于光照条件下就很快地形成。这就从细胞结构上为红色非硫细菌灵活地进行物质、能量代谢提供了可能。研究表明,当红色非硫细菌处于好氧黑暗条件下时,它们能和好氧微生物一样地通过三羧酸循环来进行有机酸的代谢。但在厌氧光照条件下,这一循环被抑制时,它们便迅速转换代谢通路,并能把有机酸异化与同化的氧化还原反应跟光氧化还原反应紧密地联结起来。这种随生长条件的变化而灵活地改变代谢类型的特性,乃是光合细菌能够处理高浓度有机废水的主要原因^[4,5]。

适合于红色非硫细菌的营养物质,主要是低分子有机酸、氨基酸和糖类。除了油脂可直接被利用外,其它营养物质必须是低分子有机物才能被利用。用 PSB 法处理有机废水的反应过程,其第一阶段与沼气发酵的产酸阶段本质相同,先由异养细菌将复杂的有机物降解,生成低级脂肪酸等小分子有机物。而在好氧条件下,酸发酵的速度可比厌氧时增加几倍。在酸发酵之后,甲烷细菌或活性污泥细菌均难以生长。这是因为可溶化的有机废水中往往含有一定量的丙酸,它对一般细菌有很强的抑制作用。而光合细菌却能在醋酸与丙酸以 5:1 共存时,达到最大增殖速率^[3]。无论在好氧还是厌氧条件下,它们都能生长,耐受相当高的有机物浓度,降解有机物的速率也远比甲烷发酵快。所以在酸发酵之后,培养光合细菌最有利。

在污水净化过程中,光合细菌还有另一

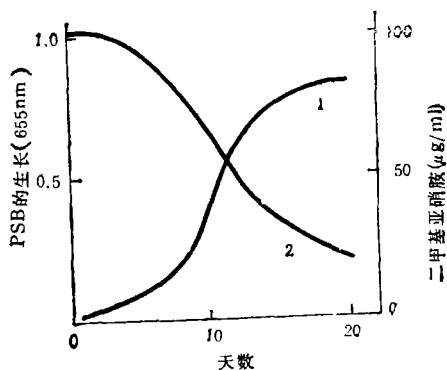


图1 光合细菌的生长与二甲基亚硝胺的分解

1 光合细菌的生长, 2 二甲基亚硝胺浓度

个重要作用^[6]: 它能代谢二甲基亚硝胺,后者是一种致癌、致畸、致突变的化合物。有人在污水里发现了四亚甲基二胺、五亚甲基二胺和其它二胺。这些化合物均能转化成亚硝胺。试验表明,光合细菌能利用二胺化合物,也能代谢二甲基亚硝胺(图1)。光合细菌的这一特性有可能用来净化被二甲基亚硝胺污染的水体。在生态系统的物质循环中,光合细菌作为还原者之一,对环境中的臭味物质

的分解起着积极的作用。它能利用硫化氢、腐胺和尸胺。在产生臭味物质的环境中接种光合细菌,往往可以大大减少释入大气的令人讨厌的气体。

三、用光合细菌处理有机废水的方法

六十年代,日本科学家观测到^[3],浓厚的有机废水在自然净化过程中出现微生物群落生长演替(图 2)。生长的程序为:(1)有机营养型微生物的繁殖;(2)光合细菌的生长繁殖;(3)藻类。他们发现,在 BOD 值高达 10000mg/L 以上的粪便污水中,异养细菌首先大量繁殖,把高分子的碳水化合物、脂肪、蛋白质分解,产生低级脂肪酸等低分子物质。接着异养细菌渐渐减少,光合细菌则利用低级脂肪酸等小分子有机物迅速繁殖,使污水的 BOD 值逐渐降到 1,000mg/L 以下。约两周后,光合细菌渐渐减少,由活性污泥微生物

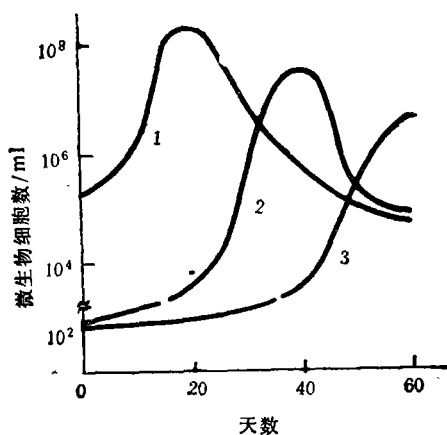


图2 有机物质分解过程中微生物区系的变化

1 异养微生物 2 光合细菌 3 藻类

和绿藻所代替,并进一步把污水净化到 BOD 值 30mg/L 以下。这一发现揭示了自然界的高浓度有机废水是通过微生物的生态学演替而被净化的。故使高浓度的有机废水达到净化,可用人工模拟方法,加入光合细菌,达到迅速净化水质的目的。

处理高浓度有机废水的路线分三步,即:

高浓度高分子有机物 $\xrightarrow{\text{异养菌}}$ 低级脂肪酸 $\xrightarrow{\text{PSB}}$ 低浓度有机物 $\xrightarrow{\text{藻类或活性污泥}}$ 废水获得净化。光合细菌在处理复杂的有机物质时,先要经过第一步使之转化为低分子物质,亦称为可溶化处理。PSB 法应用成功的关键在于基质的可溶化和保持处理系统中 PSB 的优势。还要注意加大接种量,经常补充菌体和适当加入锰、铁等重金属离子。由于 PSB 对紫外线不敏感并能耐受 1mg/L 浓度的余氯,尽可能地减少处理过程中的杂菌量是十分必要的。PSB 法处理有机废水一般采用两种方法,即半好气半黑暗法和厌气光照法。处理流程见图 3 和图 4^[2]。

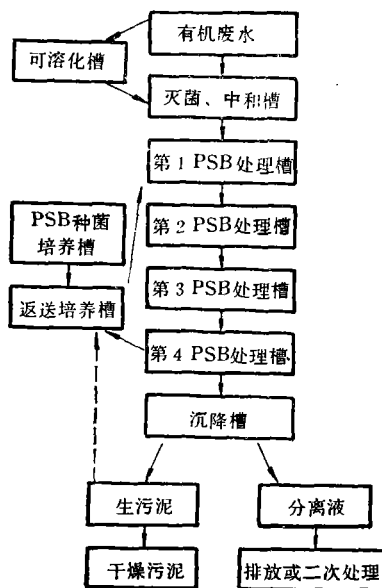


图3 光合细菌半好气半黑暗处理法

光合细菌是一大类在厌氧条件下进行不放氧光合作用的细菌的总称。目前用于有机废水处理的光合细菌主要是红螺菌科的红假单胞菌属 (*Rhodospseudomonas*)。如球形红假单胞菌 (*Rps. spheroides* van Niel) 和荚膜红假单胞菌 (*Rps. capsulata* van Niel) 等。因这类光合细菌在厌氧光照、好氧光照或好氧黑暗条件下都能利用低分子有机物迅速增殖,应用潜力很大。也有试验用红硫细

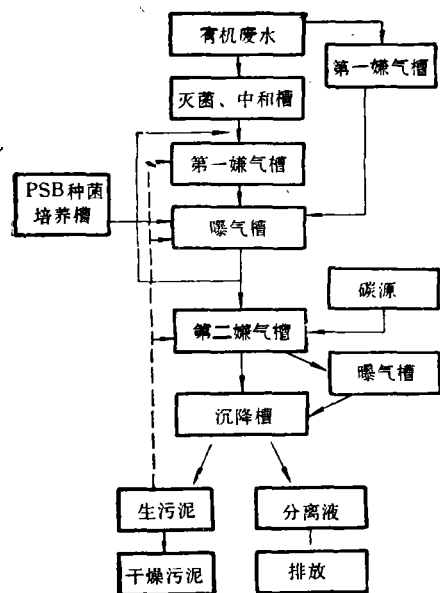


图 4 光合细菌厌气-光照处理

菌和绿硫细菌的，它们是严格厌氧菌。因有机废水成分复杂，故采用混合菌株为好。

四、运转实例

目前，利用光合细菌处理有机废水的试验，少数已进入工业化运转，大量工作仍处于试验研究阶段，已有许多专利发表^[7]。已见到用 PSB 法处理有机废水的报道有数十例^[11]。废水的 BOD 值除少数在 2000mg/L 左右外，大多数高达 10000mg/L 以上。经可溶化处理进而培养光合细菌后，废水 BOD 去除率多达 90% 以上，甚至高达 98%。其中已成功投产的有豆腐加工、浓粪便、水产加工、制氨工业和酵母工业的废水。试验中取得显著成效的有养猪、羊毛洗涤、淀粉工业、柠檬酸、罐头工业、豆腐工厂、啤酒厂、生活污水、屠场、油脂工业等废水^[3]。处理结果表明^[6]，化

表 2 酱油工业废水处理结果

项 目	可溶化槽	光合细菌第一槽	第二槽	第三槽	第四槽	分离液
水温 (°C)	30	30	30	30	30	26
pH	6.0 调正	7.0 调正	7.0 调正	7.0 调正	7.0	7.8
时间 (h)	24	24	24	24	24	/
BOD (ppm)	52000	34000	7240	2760	470	265
NH ₃ -N (ppm)	320	210	86	24	/	/
有机酸 (ppm)	14500	4370	2140	760	121	53
菌体 V.P (mL)	/	1.7	14.1	29.3	45.2	

V.P——1L 废液经 10000rpm 离心 30min 后获得的菌体 (ml)

表 3 处理槽中羊毛废水的 BOD 值和 H₂S 含量

试验处理	冬季(气温 0—8°C)		早春至夏季(气温 15—28°C)	
	BOD (ppm)	H ₂ S(ppm)	BOD (ppm)	H ₂ S(ppm)
废水原液	30000	21.0	30000	21.0
处理槽 I	15000—20000	10—17	5000—7000	5.0—10.0
槽 II	3000—5000	3.0—5.5	500—800	0.3—0.5
槽 III	1000—2000	0.3—0.5	50—200	0—0.1

槽 I——有机营养微生物；槽 II——光合细菌；槽 III——藻类

工厂有机废水的 BOD 由 5000ppm 降至 10—60ppm; 猪场污水的 BOD 由 6600ppm 降至 15ppm. 表 2 是用 PSB 法处理酱油工业废水的结果^[2]; 表 3 是羊毛工厂废水的处理结果^[8].

另外, 用 PSB 法处理有机废水的副产物——含光合细菌细胞的有机物也可作为单细胞蛋白用于饲喂鱼虾和禽畜^[9,10]. 这主要是由于光合细菌细胞无毒、增殖快, 且细胞中含有许多氨基酸和蛋白质等易于消化的物质. 日本学者的试验表明, 用 0.1% 的 PSB 细胞饲养鲫鱼鱼苗, 一个月后的成活数为 3860 尾, 比对照多 1088 尾, 成活率达 96.5%, 比对照提高 27.2%; 用 0.01% 的 PSB 细胞养鸡, 六个月内的产卵总数由对照的 24408 个增至 28116 个; 200 只母鸡产卵的平均数, 对照为 136 ± 15 个, 用 PSB 喂养的为 156 ± 7 个, 卵重也有所增加. 表 4 是净化水对植物产量的影响^[8].

表 4 光合细菌净化水对菠菜产量的影响

试验处理	鲜重 (g)	叶重 (g)	根重 (g)	根/叶
对照	48.8	40.0	8.8	0.22
I	153.2	128.0	25.2	0.20
II	520.0	420.0	100.0	0.24
III	1672.0	1260.0	412.0	0.33

12 月 19 日播种, 3 月 23 日收获; 气温 0—3℃.

五、PSB 法处理有机废水的优缺点

与活性污泥法相比, 用 PSB 法处理有机废水有以下三个优点^[6]: (1) 可以直接处理高浓度 (BOD 为几千至上万 ppm) 的有机废水, 不需稀释, 因而适用于缺水地区. 污水的 BOD 值越高, 效果越好. (2) 不存在污泥的处置问题; 处理后的污泥是很好的有机肥料, 其中的单细胞蛋白还可用作饲料. (3) 所需的场地小 (仅为活性污泥法的 1/4—1/5), 而且费用低. 因此, 这种处理法日益受到重视.

此法也有其不足之处^[2], 即处理后的废水含有菌体, 自然沉降较困难, 必须借助于离心机或化学凝聚剂, 增加了处理费用. 但总起来看, PSB 法不失为一种良好的废水处理方法. 相信在工艺路线和设备以及寻找高效处理菌等方面继续努力, 将为更多的工厂所采用.

主要参考文献

- [1] 韩守谨, 营口水产科技, 6, 38(1987)
- [2] 周晓云, 工业微生物, 1, 20(1983)
- [3] 小林正泰, 发酵と工業, 36(9), 753(1978)
- [4] 星野八洲雄, 发酵と工業, 36(7), 552(1978)
- [5] 北村博, 发酵と工業, 36(8), 659(1978)
- [6] 魏开涓, 生态学杂志, 2, 36(1984)
- [7] 富金原孝, 发酵と工業, 36(11), 941(1978)
- [8] 韩静淑, 应用微生物, 6, 1(1983)
- [9] 荻野珍吉, 发酵と工業, 36(10), 836(1978)
- [10] Shipman, R.A., et al., *Adv. Appl. Microbiol.*, 21, 161 (1977)
- [11] Siefert, E., et al., *ibid.*, 35(1), 38(1978)

(收稿日期: 1990 年 5 月 16 日)

欢迎您订阅《产业与环境》中文版

受联合国环境规划署委托, 将于 1991 年起出版发行《产业与环境》(Industry and Environment) 中文版. 该刊主要介绍世界各国工业、农业、渔业、牧业、旅游等各产业部门的环境科学技术、环境规划、环保科研最新成果以及世界重大环境问题和最新动态及信息. 实为各产业管理部门、厂矿、科研单位、大专院校的广大决策及管理人员、科研工作者及师生员工了解世界环境保护现状、趋势及未来的不可多得的刊物. 该刊一般由专家、政府官员和国际

组织代表撰稿, 以英文、法文、西班牙文在世界 100 多个国家发行, 从 1991 年起在我国出中文版. 该刊每年 4 期, 每期订价暂为 4.80 元(含邮费). 国内统一书刊号正在办理之中. 为使广大读者能连续获取本刊, 现开始办理《产业与环境》中文版订阅手续, 欲订购者请将款汇至: 北京市 934 信箱, 联合国环境规划署 INFOTERRA 中国联络点, 邮政编码: 100083.

wastewater containing 1—25%(weight) acetic acid has been developed with electrodialysis. In pilot-plant-scale operation, after the wastewater passed through a 400×800 mm electrodialyzer equipped with 30—80 pairs of membrane modules, the concentration of recovered acetic acid reached 20%(weight), and only 0.02—0.05% of it remained in wastewater, which could be discharged or reused. Furthermore, the recovered acetic acid could be utilized to produce industrial-graded acetic acid by means of extraction and distillation.

Key Words: tuffural wastewater, membrane separation, recovery, electrodialysis.

Reclamation of Wax from the Waste Clay in Oil Refining by the Method of Liquid Membrane Emulsification. Zhu Xian (Shanghai University of Science and Technology); Zhu Zhi-ping (Taicang Petrochemical Engineering Institute, Shanghai); Zhu Bing-geng (Taicang Pigment Chemical Factory No. 2, Shanghai): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(2), 1991, pp. 49—51.

The process of recovering wax is as follows: The dilute alkaline solution reacts on the waste clay to weaken or destroy its surface energy, pore structure and activation so as to release wax fully. The surfactants produced from the reaction cause spontaneous emulsification to make wax transform water-phase with unstable liquid membrane. When water is diluted to it, the membrane will break and then wax is released. The rate of wax recovery reaches 90%.

Key Words: emulsification, liquid membrane, waste clay, wax, recovery.

Chemiluminescent Method for Determination of Chromium in Natural Water by Reversed Flow Injection Analysis. Li Guang-hao (Benxi Metallurgy Training School, Liaoning Province); Yu Zan-an (Dept. of Chemistry, Northeast China University of Technology, Shenyang): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(1), 1991, pp. 52—55

The determination of chromium in natural water by reversed flow injection technology combined with ABEI-H₂O₂-Cr(III) chemiluminescent system is reported in this paper. The detection limit of this method is 4.5×10^{-12} g/ml for Cr(III), its linear range is in 1×10^{-10} — 8×10^{-6} g/ml, and the relative standard deviation is 1.1%. The sample throughput is 100 samples per hour.

Key Words: chromium, natural water, chemiluminescence, Reversed Flow Injection Analysis.

An Investigation on Aerosol Size Distribution around the Area of Xiguan Powerplant, Nan-

jing, Liang Bao-ying, Ma Ying (Environmental Protection Institute of Electrical Industry, Ministry of Energy, Nanjing): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(2), 1991, pp. 55—59.

The main intent of this work is to survey aerosol size distribution around the area of the powerplant with a vehicular instrument PC-2 Typed Aerosol Analyzer. The aerosol sizes downwind and upwind of stack plumes were monitored. The data obtained in comparison with those by other measurements demonstrated the distributive variations of suspended particulate sizes in the air of the said area and the impact of the powerplant to a certain extent.

Key Words: powerplant, aerosol size distribution, plumes.

A Simple Method for Determination of Diluted Multiple of Water Samples in Analysis of BOD₅. Yang Han (Environmental Monitoring Station of the Dongtinghu Lake, Yuanjiang, Hunan Province): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(2), 1991, pp. 60—62.

Presented in this paper is a simple, speedy and reliable method for determining BOD₅ in water samples. After the values of COD_{Cr} have been determined, three proper diluted multiples are calculated in accordance with the general formula for evaluating the coefficients of dilution:

$$C_n = \text{COD}_{Cr} / 6.5 \times 2^{n-1} \quad (n = 1, 2, 3)$$

Key Words: water sample, BOD₅, determination.

Application of Photosynthetic Bacteria (PSB) to the Treatment of Organic Wastewater. Liu Ru-lin (Department of Biology, Nankai University, Tianjin): *Chin. J. Environ. Sci.*, 12(2), 1991, pp. 63—67.

This paper reports the research on PSB in treating organic wastewater. Some heterotrophic bacteria decompose complex organic compounds into low molecular substances such as lower fatty acid, and then PSB utilize them. Some strains of *Rhodospirillaceae* have been found to utilize low the conditions of light or dark, aeration or un-aeration. Low molecular compounds and to multiple rapidly under the Conditions of light or dark, aeration or un-aeration. By means of the PSB, BOD₅ in sewage massively decreases from more than 10000 mg/L to less than 1000 mg/L. In addition, the bacteria protein can be used as by-product.

Key Words: photosynthetic bacteria, sewage, organic compound.

Photochemical Transformation of Pesticides and Its Environmental Implication. Wan Yi-