

晁雷,赵晓光,李晓东,等. 国内外乳制品工业废水生物处理技术研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(1):1-4.

国内外乳制品工业废水生物处理技术研究进展

晁雷¹, 赵晓光^{1,2}, 李晓东¹, 张巍¹, 安乐^{1,2}, 许静^{1,2}

(1. 辽宁省环境科学研究院, 辽宁沈阳 110161; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110004)

摘要:介绍了乳制品工业废水的水质特点,概括分析了国内外关于此种废水较典型的生物处理技术及乳制品废水排放标准的差距,同时对乳制品废水的资源化进行了展望。

关键词:乳制品工业废水;生物处理技术;排放标准;资源化

中图分类号: X792 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2014)01-0001-04

乳制品废水是典型的工业废水,由于近年来国家积极倡导人们消费乳制品,使其成为继粮食、肉类、水产之后必不可少的营养食品^[1],同时乳制品行业成为我国新兴的且极具发展潜力的食品行业,随之而来的是生产过程中产生的大量乳制品工业废水,该废水如果排入水体将大量消耗水中的溶解氧,给水生植物和动物带来极大的危害,因此在排放前必须经过处理。

1 乳制品工业废水简介

乳制品种类多,如巴氏奶、奶粉、炼乳、干酪以及冰淇淋等,同时与传统的牛奶相比,免疫奶等高技术含量的乳制品也大量出现^[2]。相比于种类的增加,乳制品产量的增加更能说明过去 20 年我国在该行业的发展。1995 年,我国全年乳制品产量约 52.8 万 t,而 2012 年仅 11 月产量就已经达到 245.8 万 t,前 11 个月的产量为 2 289.1 万 t^[2-3]。而一般情况下,液态奶在生产过程中产生的废水量大约是总产量的 2.5 倍,由此可见乳制品废水量非常大。

1.1 乳制品工业废水的来源

不同乳制品生产工艺不同,废水的来源自然不同,但通常乳制品加工都需要大量用水,其中 80% 左右都是用于冷凝、冷却和加热之用,这部分用水可以循环使用。而乳制品工业废水的主要来源是清洗用水,如牛奶输送、加工中的容器、管道、设备加工面清洗,产生高浓度废水;生产车间、场地的清洗和工人卫生用水,产生低浓度废水;此外,就是生活用水,一般是低浓度废水。一般情况下,需要处理的就是含有上述几种废水的混合废水。

1.2 乳制品工业废水的水质特点

从废水来源可知,乳制品废水实质上相当于原状牛奶的稀释液,因此乳制品工业废水中的有机成分组成与牛奶的成分基本相同。乳制品废水中主要含有的污染物是乳蛋白、乳糖、乳脂以及含于原乳当中的矿物质,用于清洗生产设备、管道、容器和车间地面的酸性和碱性的洗涤剂等。其中,乳糖以真溶液的形式存在于废水当中,乳蛋白和乳脂分别以悬浊液

和乳浊液的形式存在,这 2 种胶体的表面都附有牢固的水膜并带相同电荷,因此在废水中可以稳定存在。乳制品厂的废水一般呈乳黄色,比较浑浊。乳制品废水水质主要有以下几个特点:(1)废水的水质和水量有很大的波动。乳制品废水水质、水量不仅随着季节有一定的变化,即使在一天中也会存在很大的波动,一般在早晚需要进行全面清洗时,水量将增加,同时会随着清洗时间的变化而发生变化。(2)有机物含量高。乳蛋白、乳糖和乳脂的存在形式决定了废水的高有机物浓度,这也使得乳制品废水的化学需氧量(COD)非常高,有的乳制品厂的废水中 COD 高达 20 g/L,但是一般情况下,COD 都在 2~3 g/L 之间,属于高浓度的工业有机废水。(3)具有良好的可生化性能。虽然乳制品废水的 COD 很高,但是因为其五日生化需氧量(BOD₅)也基本维持在一个很高的水平,所以废水中 BOD₅/COD 的值大于 0.5,属于可生化性好的有机废水^[4]。乳制品废水还有一个特有的特性,那就是乳制品废水自身会随着时间的变化而导致水质发生变化,主要表现在 COD 降低和铵态氮含量增加等方面^[5]。乳制品废水主要的污染物指标有 COD、BOD₅、全氮含量、铵态氮含量、全磷含量、固体悬浮物含量、pH 值等。

2 乳制品工业废水的生物处理技术

相对于其他典型的工业废水来说,乳制品工业废水的污染程度相对较轻,并且污染源比较单一,因此就目前关于乳制品废水的研究远没有其他典型工业废水的研究那么多,同时由于我国乳制品工业发展较晚,关于乳制品工业废水处理的研究也比国外的一些发达国家晚。由于乳制品废水具有良好的生化性能,并且生物处理法效率高,相关的技术已经比较完善成熟,国内外对乳制品工业废水的研究主要集中在新工艺流程的设计和运行参数的优化上,所以国内外对其处理多以生物处理技术为主,并辅以其他的如隔油气浮、混凝澄清等物理化学处理技术进行预处理或是用膜过滤、地下渗滤等进行深度处理并予以回用。污水的生物处理就是利用微生物的新陈代谢作用,将污水中溶解态的、胶体状的以及细微的悬浮性的有机物质吸附和吸收的过程,根据微生物是否需氧将其分为好氧生物处理技术和厌氧生物处理技术。

2.1 好氧生物处理技术

好氧生物处理技术是在污水中有氧气存在的条件下利用好氧或兼性微生物(好氧细菌为主),使其稳定、无害化的处

收稿日期:2013-05-28

基金项目:国家科技重大专项(编号:2012ZX07202-003)。

作者简介:晁雷(1978—),男,辽宁沈阳人,博士,高级工程师,从事污水生态修复和治理工程技术研究。E-mail:13840410130@139.com。

理方法^[6]。污水当中的有机物被微生物吸附之后,通过新陈代谢作用,约有 1/3 被分解氧化成 CO_2 、 H_2O 、 NH_3 等无机物质,另外的 2/3 则被微生物同化成自身的组成物质。好氧生物处理技术反应速率较快,因此可以获得较短的水力停留时间,从一定程度上缩小了反应容器的体积,减少了构筑物的成本投入。同时,好氧生物处理工艺无论是在技术本身还是在运营管理上都积累了丰富的经验,对于乳制品工业废水的处理可以很快地加以应用。好氧生物处理主要分为活性污泥法和生物膜法两大类,其中活性污泥法主要包括传统的活性污泥法、延时曝气法、吸附再生法、AB 法以及 SBR 法等,生物膜法主要包括生物滤池、生物转盘和生物接触氧化法。由于乳制品废水的有机物含量较高,氮磷含量相对较少,对于传统的好氧生物处理方法而言,这是极易因为营养物质缺乏而引起污泥膨胀的水质之一^[7]。因此,在工艺选择时应选择可以有效控制污泥膨胀的工艺。在比较常用的好氧处理工艺中,CASS 工艺、CAST 工艺、SBR 法、生物接触氧化法以及氧化沟等都可以有效控制污泥膨胀而被广泛用于乳制品工业废水的治理当中。同时,如曝气生物滤池、好氧颗粒化污泥、移动床生物膜反应器和膜生物反应器等处理难降解有机废水的高效好氧生物处理技术对乳制品废水也有很好的处理效果^[8]。

罗韶茂采用气浮-SBR 工艺处理广东某大型冷饮厂的生产废水,废水中主要含有糖类、面粉类、脂类物质等,主要污染物 COD 在 4~5 g/L 之间, BOD_5/COD 的值大于 0.4,可生化性好。该工艺首先利用平流式气浮池去除部分脂类物质和蛋白类物质,再通过 SBR 工艺去除剩余污染物。试验表明,当进水、反应、沉淀和排水时间分别为 3、4、2、3 h,污泥负荷为 0.6 kg/(kg·d) 时,COD 的去除率在 90% 左右^[9]。李宝宏在处理豆奶粉制品生产废水时采用 SBR-混凝沉淀工艺,该废水是大豆浸泡废水、磨浆废水、设备和车间清洗废水的混合废水, COD_{Cr} 在 960~1 330 mg/L 之间,BOD 在 620~860 mg/L 之间,pH 值 6.24~6.89,固体悬浮物含量 172~198 mg/L,在稳定运行期间,COD 去除率在 89% 以上, BOD_5 去除率在 94% 以上,达到《污水综合排放标准》的二级标准^[10]。

爱尔兰学者 Healy 等利用人工湿地和循环沙滤联合技术工艺处理乳品废水,避免了乳品废水直接排放造成表面水和地下水的富营养化^[11]。Tocchi 等研究了工业污水处理厂 3 个曝气池中曝气时间/非曝气时间对处理效率的影响,分别在 45 min/15 min、15 min/15 min、15 min/45 min、30 min/30 min、30 min/45 min、30 min/60 min 条件下检测 COD、铵态氮、全磷等去除率,并观察菌胶团和原生动物之间的关系。试验结果表明,在曝气时间/非曝气时间为 30 min/45 min 时,COD 去除率维持在 88%~94% 之间,为最佳曝气强度;同时,曝气强度对细菌和原生动物群落都具有很大的影响,并且原生动物种群中微生物的多样性对于乳制品废水的处理来说很有必要^[12]。来自土耳其的 Farizoglu 等考察了膜生物反应器对乳制品废水的处理效果,应用好氧喷射环流反应器和陶瓷膜过滤单元组合工艺处理乳制品废水,研究该组合工艺处理的可行性。在水力停留时间为 3 h、容积负荷为 53 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{d}$) 时,COD 的去除率可达 98% 左右,同时由于超滤膜的截留作用,使得反应器内可以保持很高的活性污泥浓度,结果表明

喷射环流膜生物反应器系统对乳制品工业废水而言是一种行之有效的处理手段^[13]。国外另有多名科研人员开展了膜生物反应器与其他工艺相结合的组合工艺处理乳制品废水的研究^[14-15],从试验条件优化、乳制品对膜污染影响机理等各方面进行了系统的研究。

2.2 厌氧生物处理技术

厌氧生物处理技术是在没有氧气或化合态氧存在的条件下,兼性细菌与厌氧细菌降解和稳定有机物的生物处理方法^[6]。厌氧生物处理过程实质是微生物通过发酵降解有机物的过程,而对于厌氧发酵过程,研究人员持有不同的看法,因此出现了两阶段理论、三阶段理论及四菌群说等,其中两阶段理论一直被绝大多数的研究学者所接受,现在大多数的试验研究都是基于两阶段理论而开展的。所谓两阶段理论就是指厌氧发酵一般经过 2 个阶段,即水解酸化阶段和产甲烷阶段。水解酸化阶段是非产甲烷菌经过胞外酶的作用将大分子难降解的有机物分解成易降解的小分子有机物的过程,主要产物有有机酸类、醇、 CO_2 和 H_2S 等,经过水解酸化阶段的产物再经过产甲烷菌的作用分解成甲烷等终产物。在整个厌氧发酵的过程中,只有少量的有机物用于合成,相对于好氧微生物处理来说,厌氧生物处理的剩余污泥量很少,因此污泥停留时间一般都比较长。

由厌氧生物处理技术的机理可以看出,整个工艺流程并不需要外加电子受体,因此运行费用低,再加上剩余污泥量少和终产物可回收利用的特点,目前得到了深入的研究以及广泛的应用。经过研究学者的长时间研究开发,目前厌氧反应器已经发展到了第 3 代。在最初的厌氧接触工艺的基础上,为了提高反应器内污泥浓度以及污泥停留时间,同时尽可能地缩短水力停留时间,开发出以厌氧滤池(AF)、升流式厌氧污泥床(UASB)、厌氧流化床(AFB)和厌氧附着膜膨胀床(AAFEB)等工艺为代表的第 2 代厌氧反应器;而后又开发出了混合效果得到极大改善的第 3 代反应器,如厌氧流化床(UFB)、厌氧颗粒污泥膨胀床(EGSB)以及厌氧内循环反应器(IC)等^[16]。

虽然乳制品工业废水 BOD_5/COD 的值一般在 0.5 以上,可生化性好,但其中的蛋白质并不容易降解,想要达标,需要很长的水力停留时间(HRT)。以延时曝气工艺为例,要想达到我国二级标准,HRT 必须在 30 h 以上;要想达到一级标准,则需要 48 h 以上,由此可见采用完全好氧工艺不仅能耗较高,而且只能完成生物硝化过程,不能实现生物反硝化,完成真正意义上的脱氮^[17]。这时就凸显出厌氧生物处理技术的优势,尤其是第 2、第 3 代厌氧反应器不仅可以作为单独的工艺处理乳制品废水,同时还可以作为好氧处理的前处理与好氧处理工艺联用,以达到更好的处理效果。在乳制品废水处理当中,比较常用的是厌氧-好氧工艺(A/O 工艺)和水解酸化-好氧工艺(H/O 工艺)。A/O 工艺通过对有机物的降解不仅可以达到去除有机物的目的,产生的甲烷还可以作为清洁能源回用。韩冬妮采用 UASB、生物滤池和曝气生物滤池联用工艺处理乳制品废水,UASB 具有污泥浓度高、有机负荷高、水力停留时间短、无需混合搅拌设备和不设沉淀池等优点;导流曝气生物滤池集曝气、快速过滤、悬浮物截留、二曝二沉等于一体,通过这些工艺的联用稳定运行,处理后的 COD、

BOD₅ 和铵态氮含量均能达到《污水综合排放标准》一级标准^[18]。温燕等研究了 UASB - CASS 工艺对乳制品综合废水的处理效果,其中 UASB 工艺是处理乳制品废水的典型厌氧工艺,而 CASS 工艺一池多用,作为 SBR 工艺的改进,其前端的生物选择器正符合 UASB 出水的厌氧条件,可以有效地抑制污泥膨胀,整个工艺系统不仅可以取得高的 COD 去除率,同时对氮和磷还可以达到深度处理的效果^[19]。

虽然 A/O 工艺中的厌氧工艺可以起到降解大分子有机物的目的,但是污水通常会随着厌氧过程的进行而使 BOD₅/COD 的值过小,从而不再适合后续好氧生物处理工艺的运行,因此目前国内应用比较广泛的是 H/O 工艺。周斌彬等采用气浮 - 水解酸化 - 生物接触氧化工艺处理乳制品废水,气浮采用溶气气浮,水解酸化池下层采用上流式厌氧污泥床,上层采用接触式水解酸化系统,好氧阶段应用生物接触氧化池。结果表明,在水解酸化池水力停留时间为 4.96 h、平均容积负荷 1.06 kg/(m³ · d)、生物接触氧化池水力停留时间为 4.56 h、并辅以微孔曝气(气水比 20:1)时,系统可以稳定运行。整个工艺流程的 3 个阶段的 COD 去除率分别为 54%、20%、87%,工艺系统对 COD_{Cr}、BOD₅ 和固体悬浮物的去除率分别达到 96.7%、97.7%、86.9%^[20]。关晓辉等采用水解酸化 + 两级好氧移动床生物膜反应器(H - MBBR)处理某厂浑浊乳黄的乳制品废水,水解酸化池以及移动反应器中所用的填料是 SMAKWNG 公司研制的具有优秀充氧能力的新型橡胶填料,水解池和 2 个移动床反应器的池容分别为 22.5、17、17 L。当进水温度为室温,pH 值在 6 ~ 8 之间,控制 H 级和 MBBR 级的溶氧量分别为 0.2 ~ 0.3、4 ~ 5 mg/L,进水流量为 3.5 L/h 时,H - MBBR 能够稳定运行,并且对 COD、BOD₅ 和固体悬浮物的去除率分别达到 92.6%、98.1%、86.2%,出水指标可达一级排放标准^[21]。乳制品废水的排放量很大,现在很多学者也在研究适当的工艺使出水能够回用,黄征青等初步研究了水解 - 膜生物反应器工艺处理效果以及提高膜通量的方法,结果显示,添加活性炭粉末可以有效改善膜污染,同时可以使整个工艺流程中一向去除效果不佳的氮去除率达到 94%,出水水质指标达到回用标准^[22]。

国外在乳制品废水厌氧处理技术研究方面比我国具有更多的经验,但是基本上也都是关于优化工艺流程的研究,关于

机理方面的研究鲜有报道。Mauricio 等将由经过改进的 UASB 反应器、浮渣处理装置和斜管沉淀池组成的工艺和传统的乳制品处理工艺进行了对比,结果发现,在产甲烷量相同的条件下,经过简化的处理系统具有更少的处理单元,并且改进的反应系统在处理单位重量的 COD 时节省了 40% 的体积,使废水处理投入成本和运行成本降低了^[23]。Tawfik 等利用升流式厌氧污泥床和活性污泥法组合工艺对乳制品废水进行处理,主要研究了 UASB 反应器的处理效率、剩余污泥产生量以及生物降解能力等,并确定了系统处理废水的最佳水力停留时间为 2 h,乳制品工业废水和城市生活污水的混合废水经过 UASB 与活性污泥法组合工艺处理之后可用于农业灌溉^[24]。同样是利用 UASB 反应器处理乳制品废水,巴西的 Leal 等则将研究重点放在 UASB 之前乳制品废水的酶法水解上,主要研究了酶法水解对 UASB 处理效率的影响。试验表明,当油脂浓度为 1 000 mg/L 时,在 35 ℃ 下经过 14 h 酶法水解的废水 COD 去除率达到 90%,比对照高 8%,整个试验从侧面表明了升流式厌氧污泥床反应器对乳制品废水的处理是实际可行的,对冲击负荷有较强的适应能力^[25]。由此可见,UASB 工艺是乳制品废水处理的研究热点,但也不乏一些学者对 SBR 和厌氧生物滤池等工艺处理乳品废水进行研究,在一定程度上都取得了很好的效果,对工艺的实际应用有一定的指导和借鉴意义^[26-27]。

3 我国乳制品工业废水治理展望

3.1 乳制品工业水污染物排放标准

随着我国经济水平的不断提高,人们购买能力不断增强,牛奶、奶粉、奶酪等乳制品已经成为大家生活中必不可少的营养品。但是,由于我国乳制品工业发展起步较晚,乳制品工业废水的危害并没有引起足够的重视,因此关于乳品废水污染物的排放标准并不像发达国家那样得到了很好的完善。目前在环境保护部的网站上并没有关于乳制品工业水污染物排放的标准,一般试验研究文献中的出水水质都是参照 GB 8978—1996《污水综合排放标准》,而由中国食品发酵工业研究院承担编制的乳制品工业水污染物排放标准正在征求意见阶段。相对于中国相关标准制度的不健全,日本、德国、欧盟等国家或组织则有着严格的标准(表 1)。

表 1 我国《污水综合排放标准》与国外标准对比

国家或组织	标准	COD (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	固体悬浮物含量 (mg/L)	总磷含量 (mg/L)	总氮含量 (mg/L)	铵态氮含量 (mg/L)	pH 值
中国	《污水综合排放标准》二级	150	30	150	1	—	25	6.0 ~ 9.0
欧盟	一般地区	125	25	35	—	—	—	—
	敏感地区 1	125	25	35	2	15	—	—
	敏感地区 2	125	25	35	1	10	—	—
德国	所有情况	110	25	—	—	—	—	—
	特殊情况	110	25	150	2	18	10	5.8 ~ 8.6
日本	国家标准	120	120	—	8	60	—	—

从表 1 可以看出,除了在铵态氮排放方面我国有较严格的控制之外,其他方面与其他国家或组织有些许差距。没有一个现行的乳制品废水污染物排放标准也是我国乳制品废水污染没有得到很好控制的原因之一,在这一方面我国需要加紧脚步,追赶上欧盟、日本等国或组织的步伐。相信在乳制品

工业水污染物排放标准正式发布以后,我国乳制品工业废水污染物排放情况将会有很大的改善。

3.2 乳制品工业废水的回收利用

乳制品废水产生量很大,仅生产牛奶而言,废水产生量大约是牛奶产量的 2.5 倍,而其中真正用于产品本身的用水量

只占很少的一部分,大部分都是用于冷却和清洗过程,并且冷却过程对水质的要求不高,因此,可以对乳制品废水经过深度处理,实现废水的回用甚至达到零排放。同时,乳制品当中的蛋白质、乳糖等物质都是重要的能量物质,采取一定的技术将这些物质回收利用,可以用作动物的饲料或是其他方面。

目前,对于乳制品废水中营养物质的回收主要采用膜分离技术。经预处理后的乳品废水采用微滤与超滤膜技术回收其中的蛋白质,再用纳滤膜脱盐、浓缩乳糖,滤液经过反渗透膜即可达到回用或排放要求。张永锋等研究了超滤技术对乳制品废水中的蛋白质进行回收,重点讨论了操作压力、进料流量、浓缩比等因素对回收效果的影响以及超滤膜对 COD 的去除率,结果显示,当操作压力为 1.0 MPa、进料流量为 32 L/min 时,蛋白质回收率为 97.18%,COD 的去除率为 86%,具有良好的效果^[28]。印度的 Sarkar 等则结合了絮凝吸附和膜分离技术来探究乳制品废水循环回用的可行性,结果表明,相对于其他有机絮凝剂和无机絮凝剂,壳聚糖需要的剂量很小,约 10 g/L 就可以获得很好的絮凝效果,壳聚糖处理之后再经过聚合氯化铝絮凝处理则可以完全去除颜色和气味,最后经过反渗透处理则可以完全符合乳制品生产工艺流程中对于水质的要求^[29]。

4 结语

乳制品工业废水随着乳制品行业的高速发展并且因其高浓度的有机污染物而越来越受到环保领域研究学者的关注。对于废水的研究也逐渐从单纯地去除有机污染物转变成对其中有益成分进行回收利用的技术研究。我国乳制品行业发展较晚,乳制品废水治理的研究相对于欧美要晚一些,对其进行深度处理并回收利用更值得我国的环境保护科研人员进行深入研究。

参考文献:

- [1] 宋昆冈. 中国乳制品工业的 10 年回顾与展望[J]. 农产品加工·学刊,2005(9):31-34,37.
- [2] 魏传立,王福林. 我国乳制品业的现状与发展研究[J]. 农机化研究,2010,32(1):241-244.
- [3] 张朔望,范云琳,邵明君,等. 2012 年 11—12 月份中国奶业生产情况浅析[J]. 中国奶牛,2013(2):11-15.
- [4] 刘寅,杜兵,曹建平,等. 乳制品废水处理工艺选择与工程设计[J]. 给水排水,2011,37(10):61-64.
- [5] 朱凤松,张林生,刘金城,等. 厌氧附着膜膨胀床反应器处理乳品废水的研究[J]. 水资源保护,2005,21(2):16-18,35.
- [6] 高延耀,顾国维,周琪. 水污染控制工程[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2007:84-85.
- [7] 谢风岩. 乳制品废水活性污泥膨胀的原因与控制[J]. 环境保护与循环经济,2011,31(11):53-55.
- [8] 郭振英,吕荣湖,孙惠东. 高效好氧生物处理技术及其在污水处理中的应用[J]. 化工进展,2008,27(10):1533-1537,1551.
- [9] 罗韶茂. SBR 工艺处理冷饮废水[J]. 广东化工,2012,39(7):144-144,153.
- [10] 李宝宏. 间歇式活性污泥法处理乳制品废水[J]. 科学技术与工程,2006,6(20):3376-3377,3381.
- [11] Healy M G, Rodgers M, Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters[J]. Biore-source Technology,2007,98(12):2268-2281.
- [12] Tocchi C, Federici E, Fidati L, et al. Aerobic treatment of dairy wastewater in an industrial three - reactor plant: Effect of aeration regime on performances and on protozoan and bacterial communities [J]. Water Research,2012,46(10):3334-3344.
- [13] Farizoglu B, Uzuner S. The investigation of dairy industry wastewater treatment in a biological high performance membrane system [J]. Biochemical Engineering Journal,2011,57(15):46-54.
- [14] Kaewsuk J, Thorasampan W, Thanuttamavong M, et al. Kinetic development and evaluation of membrane sequencing batch reactor (MSBR) with mixed cultures photosynthetic bacteria for dairy wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(5):1161-1168.
- [15] Bick A, Plazas T J G, Yang F, et al. Immersed membrane bioreactor (IMBR) for treatment of combined domestic and dairy wastewater in an isolated farm: an exploratory case study implementing the facet analysis (FA) [J]. Desalination,2009,249(3):1217-1222.
- [16] 黄海峰,杨开,王晖. 废水厌氧生物处理技术综述与研究进展[J]. 中国资源综合利用,2005(6):37-40.
- [17] 蔡晶,张昊喆. 乳品工业废水处理[J]. 世界环境,2002(5):37-38.
- [18] 韩冬妮. UASB + 双级好氧生物工艺处理豆奶制品废水[J]. 环境科技,2011,24(6):45-47,52.
- [19] 温燕,高小红,王宏政. UASB - CASS 工艺处理乳制品综合废水[J]. 新疆环境保护,2006,28(1):21-24.
- [20] 周斌彬,帅卿,黄帽. 气浮 - 水解酸化 - 生物接触氧化工艺处理乳制品废水[J]. 科技信息,2010(34):748-749.
- [21] 关晓辉,廖玉华,尹荣. 水解 - 好氧移动床生物膜法处理乳制品废水的试验研究[J]. 东北电力学院学报,2004,24(1):15-19.
- [22] 黄征青,郭春亮,龙华云,等. 膜生物反应器处理乳制品废水的初步研究[C]//第五届全国膜与膜过程学术报告会,2005:528-532.
- [23] Mauricio P, Iván L, Liliana B. Modified UASB reactor for dairy industry wastewater: performance indicators and comparison with the traditional approach [J]. Journal of Cleaner Production,2012,26:90-94.
- [24] Tawfik A, Sobhey M, Badawy M. Treatment of a combined dairy and domestic wastewater in an up - flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor followed by activated sludge (AS system) [J]. Desalination,2008,227(1/2/3):167-177.
- [25] Leal M C M R, Freire D M G, Cammarota M C, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on anaerobic treatment of dairy wastewater [J]. Process Biochemistry,2006,41(5):1173-1178.
- [26] Dugba P N, Zhang R H. Treatment of dairy wastewater with two - stage anaerobic sequencing batch reactor systems - thermophilic versus mesophilic operations [J]. Biore-source Technology,1999,68(3):225-233.
- [27] Omil F, Garrido J M, Arrojo B, et al. Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale [J]. Water Research,2003,37(17):4099-4108.
- [28] 张永锋,王海,马宁,等. 超滤技术回收乳制品废水中蛋白质[J]. 化学工程,2009,37(3):38-41.
- [29] Sarkar B, Chakrabarti P P, Vijaykumar A, et al. Wastewater treatment in dairy industries - possibility of reuse [J]. Desalination, 2006,195(1/2/3):141-152.