

## 微藻处理畜禽养殖废水研究进展

梁长利\*, 王金希, 杨玉翰

黄淮学院 河南驻马店

**【摘要】** 畜禽养殖源废水是最主要的水污染源, 畜禽废水未经深度净化直接排放严重危害当地的生态环境和美丽乡村建设, 因此治理畜禽养殖废水已经成为当前环境保护的重点。相比传统的污水处理方法, 微藻处理畜禽养殖废水具有污染物去除率高、资源综合利用率高、成本低和改善空气质量的优点, 是可同时实现废水污染物去除和资源综合回收的废水治理方法。本文综述了我国畜禽养殖废水排放及对生态环境的污染, 微藻处理废水的优点, 微藻单独处理畜禽养殖废水和菌藻共生处理畜禽养殖废水研究现状, 微藻规模化处理畜禽养殖废水需要解决的问题, 以期为微藻处理废水所借鉴。

**【关键词】** 畜禽废水; 微藻养殖; 菌藻共生; 废水处理

**【基金项目】** 河南省科技攻关项目 (202102110117)

**【收稿日期】** 2023 年 5 月 10 日 **【出刊日期】** 2023 年 6 月 28 日 **【DOI】** 10.12208/j.aes.20230007

### Research progress on microalgae treatment of livestock and poultry breeding wastewater

*Changli Liang\*, Jinxi Wang, Yuhan Yang*

*Huanghuai University, Zhumadian, Henan*

**【Abstract】** Livestock and poultry breeding wastewater has become a leading water pollution resource, and the direct discharge of it without deep treatment has caused serious damage to the ecology and beautiful countryside. Today, the treatment of livestock and poultry breeding wastewater has become an important issue for the preservation of the environment. Compared to the traditional wastewater treatment methods, microalgae treatment of livestock and poultry breeding wastewater can achieve the removal of pollutants and the comprehensive utilization of resources from the wastewater at the same time, which is mainly because it has a high removal rate of pollutants, a high utilization rate of resources, a low cost, and improved air quality. The harm to our ecological system resulted from the direct discharge of livestock and poultry breeding wastewater. The advantages of the treatment of livestock and poultry breeding wastewater by microalgae were reviewed. This paper mainly reviews the advantages of the treatment of livestock and poultry breeding wastewater by microalgae, the advances in the treatment of livestock and poultry breeding wastewater by microalgae solely and microalgae-bacteria symbiosis, and the questions that should be resolved for the large-scale utilization of the technology. The aim of the paper is to provide some references for the application of the process to the treatment of livestock and poultry breeding wastewater.

**【Keywords】** Livestock and poultry breeding wastewater; Microalgal cultivation; Microalgae-bacteria symbiosis; Wastewater treatment

#### 1 引言

中华人民共和国生态环境部、国家统计局和中

华人民共和国农业农村部 2020 年 6 月 8 日联合发布的《第二次全国污染源普查公报》显示 2017 年, 全

\*通讯作者: 梁长利, 博士, 副教授, 研究方向: 废水生物处理。

国水污染物排放量: 化学需氧量 2143.98 万吨, 氨氮 96.34 万吨, 总氮 304.14 万吨, 总磷 31.54 万吨。农业源水污染物排放量: 化学需氧量 1067.13 万吨, 氨氮 21.62 万吨, 总氮 141.49 万吨, 总磷 21.20 万吨。畜禽养殖的水污染物排放量: 化学需氧量 1000.53 万吨, 氨氮 11.09 万吨, 总氮 59.63 万吨, 总磷 11.97 万吨。农业源, 尤其是畜禽养殖源废水已经成为全国最主要的水污染源<sup>[1]</sup>。

畜禽养殖废水富含 TN、TP、COD、重金属等危害环境的物质, 这些物质可生物处理性和降解性能好, 水量大且水质条件恶劣, 含有大量的病原菌并伴有恶臭。畜禽废水中过量的 N、P 可以引起水体的富营养化, 造成水体中溶氧量下降, 水质极度恶化, 不仅对地表及地下水造成严重危害, 还对农田生态系统有严重影响, 废水中的重金属通过农作物富集, 进入人体, 造成机体的慢性损伤, 严重危害当地及下游的生态环境及人体健康<sup>[2]</sup>。

## 2 畜禽养殖废水生物处理工艺

目前, 畜禽废水的处理技术主要有物理化学处理技术和生物处理技术。物化处理技术大致可分为吸附法、絮凝沉淀法、电化学法等方法畜禽养殖废水的生物处理工艺。物化法在畜禽废水的处理过程中, 对氨氮、磷、色度、有机物等指标都有好的去除效果, 但是成本相对较高, 容易产生二次污染, 因此, 工业化应用较少。目前生物法是畜禽养殖废水的主要技术, 有厌氧、好氧、厌氧好氧组合处理、氧化塘和人工湿地等多种可用工艺<sup>[2]</sup>。厌氧处理可有效降低有机物含量, 但是对氮、磷去除效果差; 好氧处理虽然对有机物、氮、磷等去除率高, 但是运行成本高、且对重金属、抗生素等的去除有限; 常规固液分离-厌氧处理-多级好氧处理废水仍难达标, 需增加化学混凝沉淀工艺才能使废水完全达标, 但会产生大量化学污泥并消耗化学药剂, 延长工艺路线并增加成本, 处理成本高达 10 元/t<sup>[3-5]</sup>。上述畜禽养殖废水处理工艺大多是废水中的氮、磷等富营养物进行无害化处理, 但是废水中氮、磷等资源未得到有效的回收利用, 造成了严重的资源浪费。因此, 急需开发绿色、经济、资源利用率高的畜禽养殖废水处理工艺。

## 3 微藻处理畜禽养殖废水

微藻是一类广泛存在于各类水环境中的可进行

光合自养、混合营养和异养的单细胞微生物, 具有光合效率高、繁殖快、生产周期短等特点。利用畜禽养殖废水培养微藻, 废水富含的氮、磷和一些金属离子可以为微藻提供生长所需的氮源、磷和大量元素, 同时微藻对废水中的重金属离子吸附能力强, 因此可以有效去除畜禽养殖废水中的重金属离子。相比传统的畜禽养殖废水处理技术, 微藻介导的新型畜禽养殖污水处理技术以其氮、磷、重金属离子等有害物质去除率高、占地面积小、可操作性强、资源回收率高、处理过程中可将 CO<sub>2</sub> 通过光合作用转化为 O<sub>2</sub> 进而改善当地环境、收获的微藻具有较高的经济价值, 处理成本低等优点具有极大的应用前景<sup>[6]</sup>。李润植等提出了一条“畜禽养殖—废水—微藻净化—微藻生物质—饲料蛋白等高附加值产品—品味俱佳和健康安全畜禽食品”的绿色循环新产业链, 如图 1 所示<sup>[7]</sup>。近年来, 基于微藻养殖的养猪废水处理已经成为一个研究的热点。

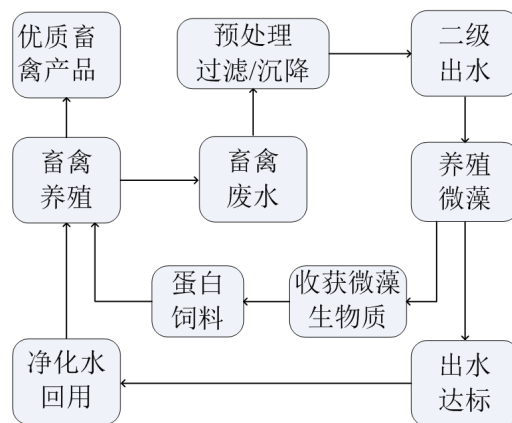


图 1 微藻净化畜禽废水联产蛋白饲料及优质畜禽产品示意图

### 3.1 微藻单独处理畜禽养殖废水

由于不同类型的废水的营养分布不平衡、或缺乏某些对微藻生长至关重要的微量元素或是存在抑制或对微藻有毒的物质, 因此只有少数微藻可以用废水进行生长<sup>[8]</sup>。刘林林等<sup>[9]</sup>研究了 15 种微藻对养猪废水氮、磷去除效果, 发现 15 株藻都能有效去除猪场养殖废水的氮磷, 所研究微藻对污水中总磷的去除率都高于 91%, 但是不同微藻对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除效果差异显著。Ganeshkumar 等<sup>[10]</sup>用小球藻直接处理养猪废水, 发现总氮 (TN) 和总磷 (TP) 去除率分别仅有 40.88% 和 3.1%; 将养猪

废水和酿酒废水按体积比 20: 80 混合后, 处理 6~10 天后 TN 和 TP 去除率分别为 89.36%和 56.56%, 表明单一废水营养成分很难满足微藻生长需求。Nam 等<sup>[11]</sup>进行了利用养猪废水养殖小球藻可行性研究, 发现在优化的养猪废水培养基中小球藻的生长速率 (0.247g/L/d) 高于传统培养基中的 (0.165 g/L/d), TN 和 TP 去除率都高于 95%。Deng 等<sup>[12]</sup>研究了利用猪粪发酵沼液养殖小球藻, 经过 7 天处理, 废水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 和 COD 的去除率分别为 99.8-99.9%、67.4-70.8%、49.3-54.4%和 73.6-78.7%。Mousavi 等<sup>[13]</sup>利用从牛粪沥浸液中分离的空星藻固定二氧化碳和处理养牛废水, 结果发现 CO<sub>2</sub> 消耗速率和空星藻生长速率分别为 0.528 g/L/d 和 0.281g/L/d, TN、NO<sub>3</sub>-N、TP 和 COD 的去除率分别为: 83.51%、80.91%、100%和 41.4%。Luo 等<sup>[14]</sup>用链带藻在最适条件下处理养猪废水 7 天, 废水 NH<sub>4</sub>-N 和 TP 的最大去除率分别为 88.26%和 95.06%。上述研究表明,

不同微藻处理养殖废水和资源综合利用的效果相差很大, 因此选育对氮、磷耐受能力强, 利用率高的微藻是微藻大规模处理养殖废水的一个重要前提。

### 3.2 藻菌共生处理畜禽养殖废水

研究表明, 利用微藻与细菌组建的藻菌共生体系可以有效去除废水中的有机物、氮磷和重金属离子, 同时可以显著提高生物量产率<sup>[15]</sup>。菌藻共生体系中, 细菌异养产生 CO<sub>2</sub> 等重要营养物质被微藻用于光合作用, 微藻光合作用产生的 O<sub>2</sub> 可供好氧细菌呼吸, 死亡微藻细胞也是细菌营养物质来源之一, 微藻以溶解碳形式转化成光合有机物可作为细菌的碳源<sup>[16]</sup>。同时, 细菌为微藻提供生长所必需的促生激素和维生素 B, 并且这种共生关系保护微藻免受其他入侵物种的危害; 藻类也作为细菌的生长环境, 与藻类相关的细菌群落通常具有高度的宿主特异性<sup>[17]</sup>。

菌藻共生体系中细菌和微藻的相互作用如图 2 所示<sup>[18]</sup>。

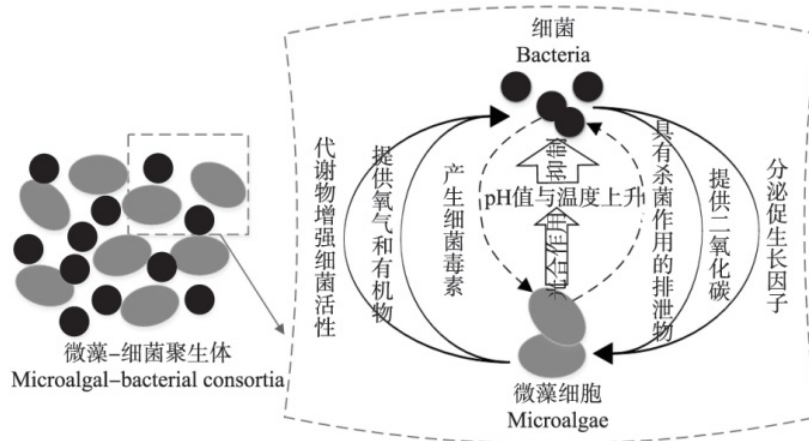


图 2 微藻-细菌聚生体之间的相互作用

Garcã-A 等<sup>[19]</sup>报道了采用 *Chlorella* sp.、*Acutodesmus obliquus* 和 *Oscillatoria* sp. 在细菌存在条件下采用光合反应器处理养猪废水 27 天, 总有机碳、无机碳、总氮、总磷的去除率分别为 86-87%、62-71%、82-85%和 90-92%, 三种藻对污染物的去除效果相差不大。Qu 等<sup>[15]</sup>研究了微藻-细菌共生系统在养猪场废水污染物去除中的应用潜力, 结果发现在微藻 *Chlorella* sp. MA1 和 *Coelastrella* sp.

KE4 与废水所含的微生物协同作用下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率分别从单独处理的 12.79%和 35.66% 增大至 99.52%和 96.06%。Wang 等<sup>[20]</sup>发现单独使用微藻 *Dictyosphaerium* sp. 处理将养猪废水的 NH<sub>4</sub>-N 和总氮从 102 mg/L 和 12 mg/L 分别降至 <5 mg/L 和 2 mg/L 所需的时间是 *Vetiver-Dictyosphaerium* sp. 的两倍多。值得注意的是, 虽然藻菌共存处理废水具有显著的经济和环境优点, 但是细菌对藻体的潜在

污染仍值得重视<sup>[19]</sup>。

### 3.3 微藻处理畜禽养殖废水耦合重金属离子去除

畜禽养殖废水含有大量的氮、磷及铜和锌等重金属离子如果未经有效处理将严重危害当地的生态环境及居民的身体健康<sup>[6,21,22]</sup>。基于微藻处理畜禽养殖废水过程中,微藻就是很好的吸附剂,它可通过生物吸附有效去除废水中重金属。Al-Homaidan 等<sup>[23]</sup>报道了螺旋藻对水中镉的去除率为 87.69%。Alam 等<sup>[24]</sup>研究了絮凝采收小球藻 JSC-7 对  $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的去除,结果表明当小球藻在培养基中含有高达 20.0 mg/L  $Zn^{2+}$  和 4.0 mg/L  $Cd^{2+}$  条件下培养三天锌和镉的去除率分别达到了 80%和 60%,表明小球藻可以有效去除废水中的  $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$ 。王愿珠<sup>[25]</sup>利用生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水,发现贴壁小球藻对 COD、氨氮、总氮、总磷的去除效率分别为: 86.8%、94.1%、85.2%和 84.3%;对重金属铜、锌、铁的去除效率分别为: 72.9%、70.0%和 73.0%。上述研究表明,微藻在处理畜禽养殖废水同时可以有效去除废水中的重金属离子。

## 4 微藻规模化应用存在的问题

### 4.1 微藻选育

畜禽养殖废水由于企业所用饲料配方不同导致废水组成和含量差别较大,废水中含有大量抑制微藻生长的高浓度富营养物质(氮、磷等)和一定数量的对微藻生长具有抑制作用的抗生素及重金属离子,因此选育对氮、磷、抗生素、重金属抗性强的微藻是微藻规模化处理畜禽养殖废水的一个重要前提和挑战。

### 4.2 微藻采收

通常,微藻由于个体小( $<70\mu m$ )和细胞表面带负电荷导致采收困难,采收成本通常占微藻总生产成本的 20–30%<sup>[8]</sup>。因此,开发经济、绿色的采收成本降低处理后废水与微藻的分离成本是微藻处理畜禽养殖废水技术工业化应用迫切需要解决的瓶颈问题。这主要包括采用适合过滤等低成本采收方法采收的微藻如螺旋藻等;开发绿色絮凝剂及絮凝效率高的絮凝采收工艺。

### 4.3 微藻利用

利用微藻处理畜禽养殖废水,开发微藻提取多糖、活性多肽、生长因子等活性成分工艺,利用处

理废水做的微藻作为生产保健品、化妆品及药品等高附加值产品的原料。利用处理畜禽养殖废水所得的微藻作为饲料添加剂,利用微藻具有的抗氧化等生物活性功能实现畜禽及其它动物养殖过程不使用抗生素,形成绿色的养殖链,在提升养殖产业的产值同时降低畜禽养殖业对环境的污染。采用附加值高、规模化养殖简单的微藻,实现畜禽养殖废水污染处理和资源综合利用的有效耦合,进而显著降低畜禽养殖废水的处理成本。

## 5 结语

畜禽养殖废水已经成为重要的水污染源,微藻处理畜禽养殖废水耦合微藻养殖技术相比传统废水处理方法可同时实现污染物去除和资源综合回收利用,是最有前景的处理技术之一。虽然微藻处理畜禽养殖废水已在实验室取得了成功,但实现规模化应用仍面临一些问题需要解决:

- 1) 筛选氮、磷等富营养物质和重金属离子去除能力强的微藻,选育可采用过滤等简单经济方式采收的微藻;
- 2) 构建合适的菌藻共生体系,不需要进行废水培养基的灭菌和可露天化处理,进而降低畜禽养殖废水的处理成本;
- 3) 开发低成本、绿色的大规模微藻采收工艺,降低微藻处理畜禽养殖废水的成本;
- 4) 利用处理废水所得微藻作为原料,开发生物活性物质如多糖、生长因子和多肽等生物活性成分提取工艺,开发微藻保健品、化妆品和动物饲料添加剂等高附加值产品。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[B], 中华人民共和国生态环境部, 2020.
- [2] 唐凯. 国内畜禽养殖废水处理技术的研究进展[J]. 应用化工. 2018, 47(10): 2774-2778.
- [3] 马晓冬, 张星梓, 胡玉洪, 刘艳. 畜禽养殖废水处理方法的研究进展[J]. 再生资源与循环经济. 2019,12(1), 36-38+42.
- [4] 韩伟铖, 颜成, 周立祥. 规模化猪场废水常规生化处理的效果及原因剖析[J]. 农业环境科学学报. 2017, 36(5): 989-995.
- [5] 张颖, 邓良伟. 猪场废水厌氧消化过程中的除磷效果[J].



- 生态与农村环境学报. 2012, 28(1): 93-97.
- [6] 马浩天,李润植, 张宏江, 等. 基于微藻培养处理畜禽养殖废水的研究进展[J]. 生物技术通报. 2018, 34(11): 89-96.
- [7] 李润植, 季春丽, 崔红利. 微藻生物技术助力功能农业[J]. 山西农业大学学报(自然科学版). 2018, 38(3): 1-12.
- [8] Zhou WG, Chen P, Min M, et al. Environment-enhancing algal biofuel production using wastewaters[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014, 36:256-269.
- [9] 刘林林, 黄旭雄, 危立坤, 等. 15 株微藻对猪场养殖污水中氮磷的净化及其细胞营养分析[J]. 环境科学学报. 2014, 34(8): 1986-1994.
- [10] Ganeshkumar V, Subashchandrabose SR, Dharmarajan R, et al. Use of mixed wastewaters from piggery and winery for nutrient removal and lipid production by *Chlorella sp.* MM3[J]. Bioresource Technology. 2018, 256:254.
- [11] Nam K, Lee H, Heo SW, et al. Cultivation of *Chlorella vulgaris* with swine wastewater and potential for algal biodiesel production[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 2: 1171-1178.
- [12] Deng XY, Gao K, Zhang RC, et al. Growing *Chlorella vulgaris* on thermophilic anaerobic digestion swine manure for nutrient removal and biomass production[J]. Bioresource Technology. 2017, 243: 417-425.
- [13] Mousavi S, Najafpour GD, Mohammadi M, et al. Cultivation of newly isolated microalgae *Coelastrum sp.* in wastewater for simultaneous CO<sub>2</sub> fixation, lipid production and wastewater treatment[J]. Bioprocess Biosyst Eng. 2018, 41(7): 519-530.
- [14] Luo LZ, Shao Y, Luo S, et al. Nutrient removal from piggery wastewater by *Desmodesmus sp.* CHX1 and its cultivation conditions optimization[J]. Environmental Technology. 2019, 40(21): 2739-2746.
- [15] Qu W, Zhang C, Chen X, et al. New concept in swinewastewater treatment: development of a self-sustaining synergistic microalgae-bacteria symbiosis (ABS) system to achieve environmental sustainability[J]. Journal of Hazardous Materials. 2021, 418:126264.
- [16] 皮永蕊, 吕永红, 柳莹, 等. 微藻-细菌共生体系在废水处理中的应用[C]. 中国微生物学会第七届地质微生物学术研讨会, 上海, 2018,.
- [17] Franz G, Vera T, Jutta W, et al. Algae as an important environment for bacteria – phylogenetic relationships among new bacterial species isolated from algae[J]. Phycologia, 2013, 52: 14–24.
- [18] 潘禹, 王华生, 刘祖文, 等. 微藻废水生物处理技术研究进展[J]. 应用生态学报. 2019, 30(7): 2490-2500.
- [19] Garcã D, Posadas E, Blanco S, et al. Evaluation of the dynamics of microalgae population structure and process performance during piggery wastewater treatment in algal-bacterial photobioreactors[J]. Bioresour Technol. 2018, 248: 120-126.
- [20] Wang X, Ni X, Cheng Q, et al. Vetiver and *Dictyosphaerium sp.* co-culture for the removal of nutrients and ecological inactivation of pathogens in swine wastewater[J]. Journal of Advanced Research. 2019, 20: 71-78.
- [21] Godos ID, Vargas VA, Blanco S, et al. A comparative evaluation of microalgae for the degradation of piggery wastewater under photosynthetic oxygenation[J]. 2010, 101(14): 5150-5158.
- [22] 朱丽娜, 姜海, 诸东海, 等. 分散养殖污染治理中政府定位及公共服务供给研究[J], 农业环境与发展, 2013, 2: 7-10.
- [23] Al-Homaidan AA, Alabdullatif JA, Al-Hazzani AA, et al. Adsorptive removal of cadmium ions by *Spirulina platensis* dry biomass[J]. Saudi Journal of Biological Sciences. 2015, 22(6): 795-800.
- [24] Alam MA, Wan C, Zhao XQ, et al. Enhanced removal of Zn<sup>2+</sup> or Cd<sup>2+</sup> by the flocculating *Chlorella vulgaris* JSC-7[J]. Journal of Hazardous Materials. 2015, 289: 38-45.
- [25] 王愿珠, 程鹏飞, 刘德福, 等. 生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果[J]. 环境科学. 2017, 38(8): 3354-3361.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS