



絮凝技术对养殖粪水中污染物和养分的去除潜力研究

张云颖, 张晓航, 柏兆海, 马林, 王选

Study on the potential of pollutant and nutrient removal from livestock manure wastewater by flocculation treatment technology

ZHANG Yunying, ZHANG Xiaohang, BAI Zhaohai, MA Lin, and WANG Xuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20240622>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

离心微滤对猪场废水固液分离效果研究

Effect of centrifugal microfiltration on solid-liquid separation of pig farm wastewater

中国生态农业学报(中英文). 2022, 30(6): 1027-1035

集约化养殖粪尿氮磷分布特征及耕地消纳潜力分析

Distribution of manure-derived nitrogen and phosphorus from intensive livestock farming and their recycling potential

中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(3): 468-475

养殖废水中磷鸟粪石结晶法回收潜力及影响因子研究

The potential and the impact factors for phosphorus recovery from wastewater via struvite precipitation

中国生态农业学报(中英文). 2022, 30(8): 1346-1354

农田土壤团聚体有机碳对秸秆还田响应的Meta分析

Response of farmland soil aggregate-associated organic carbon to straw return: a meta-analysis

中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(1): 41-52

粪/菌秸秆条带混施对黑土有机无机复合体组成及有机碳分布特征的影响

Effects of manure/biological agent-straw strip mixing on the composition of organo-inorganic complexes and characteristics of organic carbon distribution in black soil

中国生态农业学报(中英文). 2024, 32(2): 273-282

黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应: Meta分析

Effect of green manure on soil water and crop yield in the Loess Plateau of China: A Meta-analysis

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(11): 1879-1892



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20240622

CSTR: 32371.14.cjea.20240622

张云颖, 张晓航, 柏兆海, 马林, 王选. 絮凝技术对养殖粪水中污染物和养分的去除潜力研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(2): 361-373

ZHANG Y Y, ZHANG X H, BAI Z H, MA L, WANG X. Study on the potential of pollutant and nutrient removal from livestock manure wastewater by flocculation treatment technology[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(2): 361-373

絮凝技术对养殖粪水中污染物和养分的去除潜力研究*

张云颖^{1,2†}, 张晓航^{1†}, 柏兆海¹, 马林³, 王选^{1**}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 南京大学 南京 210008)

摘要: 养殖业的迅猛发展保障了我国肉蛋奶等畜产品的供应, 然而大量养殖粪水的产生与不当处理使养殖业成为水体污染物的重要排放源, 制约了养殖业的绿色可持续发展。絮凝处理技术是一种被广泛应用于养殖粪水固液分离的技术, 然而不同种类絮凝剂对粪水不同指标的去除效果具有较大的不确定性。为了明确不同种类絮凝剂在不同性质粪水中的应用潜力及其影响因素, 本研究采用 Meta 分析方法, 对 41 篇文章中的 1 194 项观察结果进行了统计分析。结果表明, 絮凝剂的使用可以有效去除养殖粪水中悬浮颗粒物, 养殖粪水中总固体和挥发性固体的去除率分别为 62.95% 和 70.55%, 进而实现对污染物和养分的分离; 养殖粪水中氨氮、总氮、总磷和总钾的去除率分别为 37.53%、48.04%、69.95% 和 23.28%。絮凝效果受絮凝剂种类和养殖粪水性质的影响, 无机絮凝剂对总固体、总磷和总钾的去除效果较高, 而有机絮凝剂对粪水中总氮的去除率最高, 复合絮凝剂则对氨氮和总磷的去除率最高。养殖粪水中污染物和养分含量是影响不同絮凝剂絮凝效果的关键因素, 当化学需氧量 $\leq 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 无机絮凝剂对化学需氧量和总磷的去除率最高, 分别达 80.51% 和 87.15%。当化学需氧量 $> 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 复合絮凝剂对化学需氧量、氨氮和总磷的去除率最高, 分别达 62.49%、61.72% 和 86.68%。因此, 优化粪水特征与絮凝剂特性的组合是提升粪水中各项指标去除效率的有效途径, 代表着该领域未来的研究方向。

关键词: 养殖粪水; 养分分离; Meta 分析; 絮凝; 去除率

中图分类号: TP79; TP79

Study on the potential of pollutant and nutrient removal from livestock manure wastewater by flocculation treatment technology*

ZHANG Yunying^{1,2†}, ZHANG Xiaohang^{1†}, BAI Zhaohai¹, MA Lin³, WANG Xuan^{1**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing University, Nanjing 210008, China)

* 河北省重点研发计划项目 (22324002D, 22326802D)、河北省现代农业产业技术体系建设专项资金 (HBCT2024230202, HBCT2024270203) 和中国科学院青年创新促进会人才项目 (2021095) 资助

** 通信作者: 王选, 主要从事农业废弃物资源化利用技术与碳氮转化机制等方面研究。E-mail: wx2008xw@yeah.net

† 共同第一作者: 张云颖, 主要从事农业废弃物资源化利用等方面研究, E-mail: 1950427218@qq.com; 张晓航, 主要从事农业废弃物资源化利用等方面研究, E-mail: zhangxiaohang@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2024-10-08 接受日期: 2024-11-30

* This study was supported by the Key Research and Development Project of Hebei Province (22324002D, 22326802D), the Special Fund for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System of Hebei Province (HBCT2024230202, HBCT2024270203) and Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2021095).

** Corresponding author, E-mail: wx2008xw@yeah.net

† Equivalent contributors

Received Oct. 8, 2024; accepted Nov. 30, 2024

Abstract: In recent years, China's livestock industry has flourished, becoming a crucial component of the nation's food supply chain by consistently producing abundant meat, eggs, and dairy products. However, this rapid industrial growth has inadvertently led to the generation of significant volumes of livestock wastewater, posing a considerable environmental threat. Efficient treatment is necessary to wastewater laden with pollutants to mitigate its adverse effects on aquatic ecosystems. Among the various treatment technologies, flocculation has emerged as a preferred method due to its effectiveness in solid-liquid separation within livestock operations. Despite its widespread adoption, there remains considerable uncertainty regarding the effectiveness of different flocculants in removing specific pollutants from livestock wastewater. To address this, a comprehensive Meta analysis is conducted in this study, analyzing 1 194 observations sourced from 41 articles. The findings provide valuable insights into the efficacy of flocculation treatment. The results indicate that the use of flocculants has a remarkable effect on the removal of suspended solids in livestock wastewater. Specifically, removal rates of total solids and volatile solids are 62.95% and 70.55%, respectively, facilitating the effective separation of nutrient elements. Notably, the removal rates of ammonia nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium are also significant, which were 37.53%, 48.04%, 69.95%, and 23.28%, respectively. These findings underscore the critical role of flocculation in managing livestock wastewater pollutants. The study further reveals that the flocculation effect is influenced by both the types of flocculants and the specific characteristics of the livestock wastewater. Inorganic flocculants exhibit superior removal effects on total solids, total phosphorus, and total potassium, while organic flocculants demonstrates the highest removal rate for total nitrogen. Composite flocculants, combining the advantages of both inorganic and organic flocculants, show the highest removal rates for ammonia nitrogen and total phosphorus, showing their versatility and effectiveness in treating a broader range of pollutants. The content of pollutant and nutrients in livestock wastewater is emerged as a pivotal factor affecting flocculation effectiveness. Specifically, when the chemical oxygen demand is less than or equal to $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, inorganic flocculants achieve the highest removal rates for chemical oxygen demand, and total phosphorus. Conversely, when chemical oxygen demand exceeds $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, composite flocculants demonstrate the highest removal rates for chemical oxygen demand, ammonia nitrogen, and total phosphorus. This highlights the importance of selecting the appropriate flocculant based on the specific characteristics of the livestock wastewater. In conclusion, optimizing the combination of flocculants based on the specific characteristics of livestock wastewater is an effective strategy to enhance pollutant removal rates. This approach not only improves wastewater treatment efficiency, but also aligns with green and sustainable development principles. Future research should continue to explore optimal flocculant combinations and wastewater characteristics to further refine and enhance this method, ultimately contributing to the protection of aquatic environments and promoting sustainable livestock production.

Keywords: livestock wastewater; nutrient separation; Meta analysis; flocculation; removal rate

近年来, 由于我国人口持续增长和膳食结构不断改善, 农产品需求量不断增加。根据联合国粮农组织预测, 2030 年全球肉类供应量将达 3.74 亿 t, 由中国肉类产品需求导致的产量增长占比较高^[1]。肉类供应量的增加导致畜牧业快速发展, 同时也导致养殖废弃物大量产生。据统计, 我国畜禽粪便年产生量高达 38 亿 t, 其中粪水量约 20 亿 t^[2-3], 同时, 其综合利用率较低。如何进一步提升养殖粪水的利用率成为缓解养殖业环境污染的关键。

养殖粪水具有悬浮物含量高、化学需氧量(COD)高、养分(如氮、磷)含量高、毒害物含量低的“三高一低”特点^[4], 这也是我国畜禽养殖业的显著特征。第二次全国污染源普查数据显示, 2017 年我国畜禽养殖业 COD 排放量 1 000.53 万 t, 占农业源 COD 总排放量的 93.8%; 总氮(TN)排放量 59.63 万 t, 占农业源 TN 总排放量的 42.1%; 总磷(TP)排放量 11.97 万 t, 占农业源 TP 总排放量的 56.5%^[5]。养殖粪水的不当处理和利用已成为我国水体富营养化和流域面源污染的主要原因。但是, 养殖粪水中富含的 C、N、P 等养分元素是宝贵的养分资源。若通过技术

手段实现养殖粪水中 C、N、P 养分的回收, 可以在提高养殖粪水水质的同时, 将养分留存于固体粪便中, 并转化成有机肥料, 因此该技术具有较高的环境效益和经济效益^[6]。

目前, 养殖粪水中养分元素的分离与回收主要通过离子交换法、膜过滤法、沉淀法、浮选法、萃取法、吸附法、混凝/絮凝法、生物法和电解法等方法实现^[7]。混凝/絮凝法的处理效果好且处理效率高, 因此获得了广泛关注, 并引发学者积极参与相关研究^[8-11]。分离后的液体组分溶解性氮含量高, 可直接作为液体肥料就近施用于农田^[12-13]; 固体组分富含有机质(OM)和养分(N、P), 通过堆肥处理加工成有机肥, 可以实现远距离输送, 进而实现区域间废弃物中养分的循环利用^[13-15]。然而, 不同种类絮凝剂对粪水不同指标的去除效果具有较大的不确定性。Fragoso 等^[8]将无机絮凝剂 $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ 和有机絮凝剂(壳聚糖)添加到猪粪中进行絮凝, 无机絮凝剂去除了 49% 的总固体(TS)、66% 的挥发性固体(VS)、63% 的 COD、59% 的生化需氧量(BOD)、94% 的 TP 和 4% 的总钾(TK); 有机絮凝剂去除了 38% 的 TS、44%

的 VS、56% 的 COD、50% 的 BOD、70% 的 TP 和 6% 的 TK; 除 TK 外, 无机絮凝剂的去除效果优于有机絮凝剂。Paz Pérez-Sangrador 等^[11] 将阳离子型聚丙烯酰胺添加到粪水中发现, 94% 的 TS、93% 的 VS 和 85% 的 COD 被去除, 效果显著优于无机絮凝剂。相较于单一絮凝剂, 部分学者更倾向于复合絮凝剂的使用。王建波等^[16] 将生物絮凝剂和无机絮凝剂进行组合, 去除了 50.72% 的 TS、55.7% 的 COD、28.26% 的氨氮 (TAN) 和 47.35% 的 TP; 贺旭德^[17] 则将无机絮凝剂和有机絮凝剂复合使用, 取得了良好的絮凝效果, 99.37% 的 TS、55.7% 的 COD、30.92% 的 TAN 和 99.88% 的 TP 被去除。不同种类絮凝剂去除粪水不同养分/污染物的能力具有不确定性, 因此, 需要明确不同种类絮凝剂在不同性质粪水中的应用潜力及影响因素。本文基于 Meta 分析方法, 开展了不同种类絮凝剂对养殖粪水中有机碳和养分元素去除潜力的研究, 为明晰不同种类絮凝剂与各类粪水之间的内在联系、准确判断不同物理化学性质的粪水最适宜应用的絮凝剂类型、探索絮凝剂复配应用方案等提供了更为丰富、深入且具有指导意义的理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究采用的数据主要来源于国内外公开发表的文献与资料, 使用 Web of Science、Google Scholar 和中国知网, 检索关键词: 养殖粪水 (slurry、waste-water、manure、cattle、cow、pig、dairy farm、cattle farm、cattle ranch、farm 和 farm wastewater)、无机絮凝剂 (inorganic flocculant)、聚合氯化铝 (polyaluminum chloride、PAC)、聚合硫酸铁 (polyferric sulfate、PFS)、有机絮凝剂 (organic flocculant)、聚丙烯酰胺 (polyacrylamide、PAM)、壳聚糖 (chitosan、CTS) 和复合絮凝剂 (combined flocculant)。检索时间为 1995—2023 年底。根据检索文献与资料, 筛选与本研究相关的材料与数据。

1.2 数据筛选、提取与分析

文献与资料的数据筛选标准主要包括以下 3 点: 1) 试验对象为养殖粪水或模拟养殖粪水 (养猪粪水和养牛粪水), 主要处理技术为混凝/絮凝; 2) 粪水悬浮物分离过程中使用至少 1 种絮凝剂; 3) 样品分析指标包括 TS、VS、COD、TAN、TN、TP 和 TK 去除率。由于悬浮物属于 TS, 且在粪水中二者含量具有强相关性, 所以本研究以 TS 表征悬浮物。

文献和资料中的数据直接从表格、正文和附件中获取, 或利用 Getdate Graph Digitizer 软件从图中提取。利用 IBM SPSS Statistics 26 软件, 分析不同试验处理间差异的显著性。本文基于此方法, 构建了针对混凝/絮凝技术处理养殖粪水的基础数据库, 该库共包含 41 篇文献与资料, 涉及 1 194 条试验与分析指标数据。文中用缩写代表关键词, IF、OF、CF 和 Flo 分别代表无机絮凝剂、有机絮凝剂、复合絮凝剂和所有絮凝剂的整体影响。

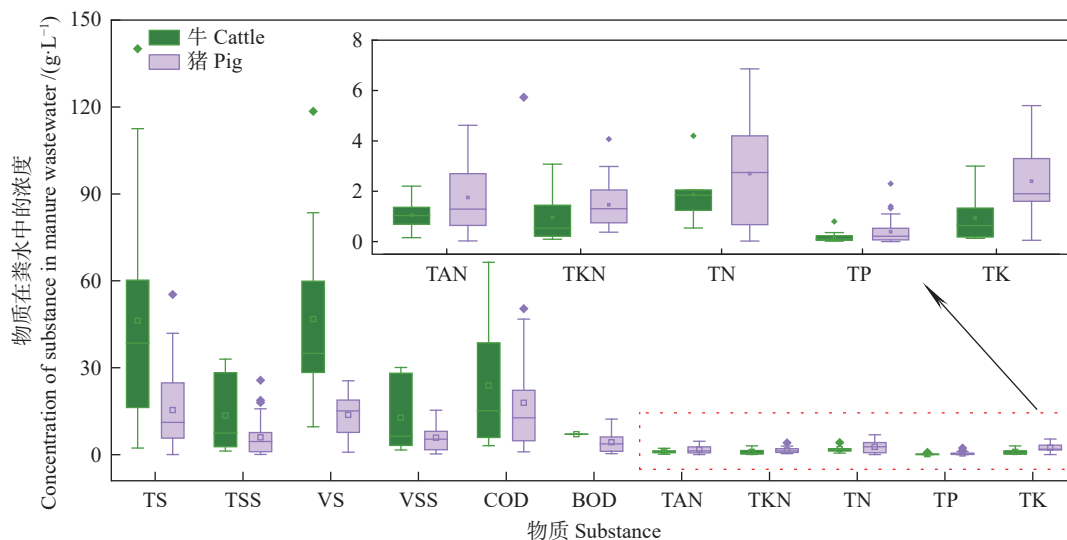
2 结果与讨论

2.1 养殖粪水水质特征

养殖粪水水质特征如图 1 所示。养猪粪水的 TAN、凯氏氮 (TKN)、TN、TP 和 TK 浓度均值均高于养牛粪水; 养牛粪水的 TS、总悬浮物 (TSS)、VS、挥发性悬浮物 (VSS)、COD 和 BOD 浓度均值则均高于养猪粪水。这些指标产生差异的主要原因在于畜种饲料种类、消化方式和养殖场清粪工艺的不同。生猪养殖主要以饲喂精饲料 [如玉米 (*Zea mays*) 和豆粕] 为主^[18], 这些饲料中含有较丰富的蛋白质、脂肪和可溶性碳水化合物, 进而导致猪粪尿养分含量更高。肉牛/奶牛养殖主要以饲喂草料 (如干草和青贮饲料) 为主, 这些饲料中的纤维素含量较高, 蛋白质和其他可吸收养分含量相对较低。另外, 猪为单胃动物, 其对植物性饲料的消化效率低于反刍动物, 进而导致其粪尿中的 TAN、TKN、TN、TP 和 TK 含量较高。牛作为反刍动物, 具有更强大的胃部消化系统, 可以更充分地消化和吸收植物性饲料中的营养物质^[19], 因此, 养牛粪水中的 COD 和 BOD 浓度更高。

2.2 絮凝剂类型对养殖粪水中污染物和养分的影响

目前, 养殖粪水絮凝处理工艺中广泛使用的药剂主要分为 3 大类, 分别为: 无机絮凝剂、有机絮凝剂和复合絮凝剂^[20-21]。不同类型絮凝剂 (IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂) 对养殖粪水中污染物和养分的去除率如图 2 所示。整体来看, 与不添加絮凝剂相比, 絮凝剂的添加对养殖粪水污染物和各养分的去除有显著效果, 其中 TS 去除率为 62.95%, VS 去除率为 70.55%, COD 去除率为 49.38%, BOD 去除率为 54.33%, TAN 去除率为 37.53%, TN 去除率为 48.04%, TP 去除率为 69.95%, TK 去除率为 23.28%。无机絮凝剂对 TS 的去除效果优于有机絮凝剂和复合絮凝剂, 去除率分别高 20.22 个百分点和 13.00 百分点。这是因为无机



TS: 总固体; TSS: 总悬浮物; VS: 挥发性固体; VSS: 挥发性悬浮物; COD: 化学需氧量; BOD: 生化需氧量; TAN: 氨氮; TKN: 凯氏氮; TN: 总氮; TP: 总磷; TK: 总钾。TS: total solids; TSS: total suspended matter; VS: volatile solids; VSS: volatile suspended matter; COD: chemical oxygen demand; BOD: biochemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TKN: Kjeldahl nitrogen; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; TK: total potassium.

图 1 养猪粪水和养牛粪水的水质特征

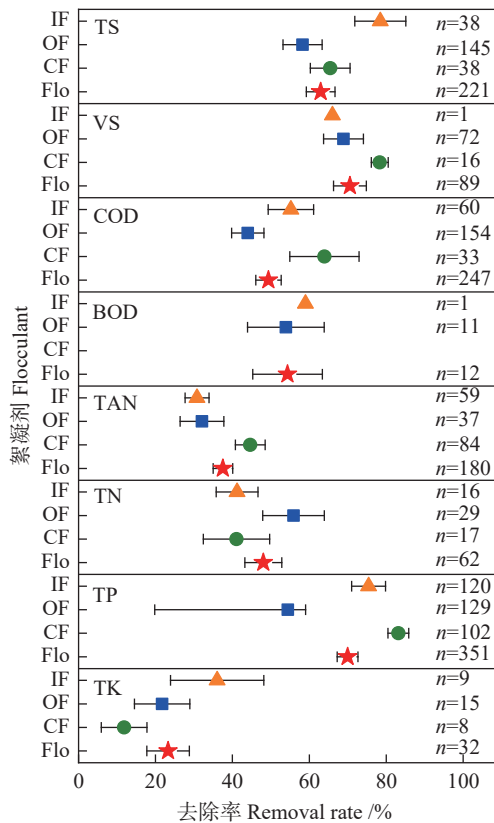
Fig. 1 Water quality characteristics of pig and cattle manure wastewater

絮凝剂中的高价金属离子(如 Fe^{3+} 和 Al^{3+}) 能够与水中带负电的悬浮颗粒发生电荷中和,降低颗粒的 ζ 电位,使其失去稳定性,从而促进颗粒聚集。相较于有机絮凝剂和复合絮凝剂,无机絮凝剂对 TK 的去除率也最高,分别高 14.31 个百分点和 24.00 百分点。有机絮凝剂对 TN 的去除率最高,分别比无机絮凝剂和复合絮凝剂的去除率高 14.67 百分点和 14.85 百分点。在酸性条件下,有机絮凝剂中所携带的羧基可以电离出氢离子,形成带负电的羧酸根离子,与废水中的阳离子含氮物质(如 NH_4^+) 发生电荷中和反应,有助于降低含氮物质颗粒之间的静电斥力,促进颗粒间的聚集和絮凝剂对颗粒的吸附;在碱性条件下,氨基接受氢氧根离子,形成带正电的铵根离子,可以与废水中的阴离子含氮物质(如硝酸根和亚硝酸根)发生电荷中和反应,同样有助于含氮物质的去除。复合絮凝剂在 VS、COD、TAN 和 TP 上均有较好的去除效果,去除率可分别达 78.31%、63.94%、44.64% 和 83.16%。复合絮凝剂具有无机絮凝剂含有的金属离子和有机絮凝剂具有的多种功能基团,可以在复杂的化学反应下去除多种物质。在所有指标中,不同类型絮凝剂对 TK 的去除率最低。钾在粪水中以溶解态存在,且絮凝的目标去除物主要为粪水中的悬浮物和胶体,因此,絮凝剂无法实现对粪水中钾的捕捉和去除^[22]。

2.3 粪水类型对絮凝效果的影响

不同种类絮凝剂对猪粪水和牛粪水中污染物和

养分去除率的结果如图 3 所示。在养牛粪水中,复合絮凝剂对 TN 的去除效果最优,为 68.00%;有机絮凝剂对 TAN 的去除效果最优,为 31.59%;无机絮凝剂对 TK 的去除效果最优,为 40.05%。在 COD 去除方面,不同种类絮凝剂的去除效果表现为:无机絮凝剂(IF)>有机絮凝剂(OH)。在 TAN 去除方面,不同种类絮凝剂的去除效果表现为:有机絮凝剂(OH)>无机絮凝剂(IF)。在 TN 去除方面,不同种类絮凝剂的去除效果表现为:复合絮凝剂(CF)>有机絮凝剂(OH)>无机絮凝剂(IF)。在 TK 去除方面,不同种类絮凝剂的去除效果表现为:无机絮凝剂(IF)>有机絮凝剂(OH)>复合絮凝剂(CF)。复合絮凝剂凭借其丰富的附着位点,能够高效地吸附悬浮物、硝化细菌和反硝化细菌,对牛粪水中氮元素的去除效果显著。有机絮凝剂对 TAN 的去除效果较好。一方面,有机絮凝剂可能与金属离子形成螯合物,间接影响 TAN 的去除;另一方面,某些金属离子可能与粪水中的 TAN 形成络合物,影响其在水体中的稳定性。通常无机絮凝剂对 TK 的去除率不是最优的,但在某些环境下,无机絮凝剂可能参与离子交换过程,促使 K 离子与絮凝剂中的其他离子发生交换,从而被去除。在养猪粪水中,复合絮凝剂对 COD 和 TAN 的去除效果最优,分别为 63.08% 和 48.24%;有机絮凝剂对 TN 和 TK 的去除效率最高,为 56.54% 和 19.24%。在 COD 去除方面,不同种类絮凝剂的去除效果表现为:复合絮凝剂(CF)>有机絮凝剂(OH)>无机絮凝剂



TS: 总固体; VS: 挥发性固体; COD: 化学需氧量; BOD: 生化需氧量; TAN: 氨氮; TN: 总氮; TP: 总磷; TK: 总钾; n: 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。TS: total solids; VS: volatile solids; COD: chemical oxygen demand; BOD: biochemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TN: total nitrogen; TP: total phosphorus; TK: total potassium; n: sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 2 不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分去除率的平均效应值和 95% 的置信区间

Fig. 2 Average effect size and 95% confidence interval of the removal rate of different types of flocculants on the pollutant and nutrient in livestock manure wastewater

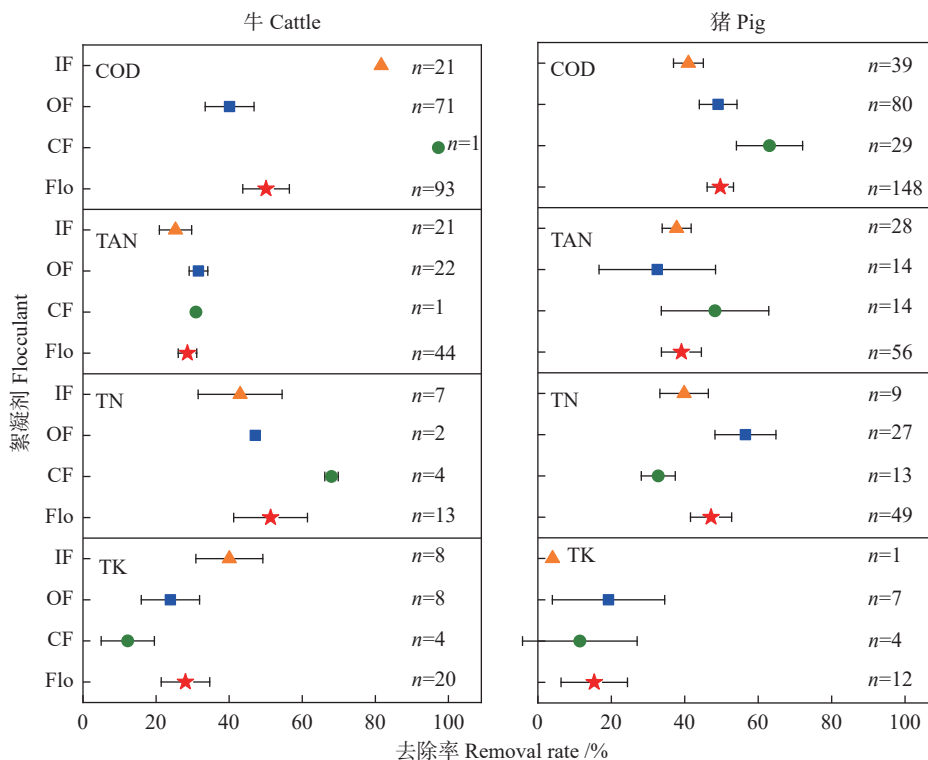
(IF)。在 TAN 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 无机絮凝剂 (IF) > 有机絮凝剂 (OF)。在 TN 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 有机絮凝剂 (OF) > 无机絮凝剂 (IF) > 复合絮凝剂 (CF)。在 TK 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 有机絮凝剂 (OF) > 复合絮凝剂 (CF)。这可能是因为复合絮凝剂中可能包含具有强吸附或螯合能力的组分, 这些组分可以与粪水中的有机物或氨氮形成稳定的复合物。对 TN 和 TK 去除率最高的絮凝剂类型为有机絮凝剂, 因为有机絮凝剂可能被设计成易于生物降解的结构, 它们在水处理系统中能够促进微生物生长, 这些微生物可以利用部分溶解态氮作为营养源, 从而去除 TN 中某些形式的氮, 有机絮凝剂形成的絮体可能吸附部分 TK。

整体来看, 废水类型对絮凝剂污染物和养分去除效果的影响不显著, 不具有强相关性, 这可能是因为不同地区猪场和牛场所处气候带、饲料类型、粪便清理方式等都具有较大差异, 所以粪水性质也存在较大差异, 以至于即使是同类废水也无法确定其共同特点。

2.4 养殖粪水 pH 对养分分离效果的影响

不同 pH 条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分的去除率如图 4 所示。当 $pH \leq 7.5$ 时, 复合絮凝剂 (CF) 对 TS、COD、TAN 和 TP 均具有最高的去除率, 分别达 68.62%、81.44%、66.26% 和 92.68%。在 TS 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF)。在 TAN 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF) > 无机絮凝剂 (IF)。在 COD 和 TP 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果均表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 无机絮凝剂 (IF) > 有机絮凝剂 (OF)。这可能是因为, 在 $pH \leq 7.5$ 时, 有机絮凝剂的去除效果受溶液 pH 的影响较小, 无机絮凝剂 (如铝盐和铁盐) 在酸性溶液中难以水解, 主要以正价离子形式存在, 其电荷状态对 TS 和 TAN 的吸附能力较弱, 因此, 絮凝效果比有机絮凝剂差^[23]。随着 pH 增加, 金属离子的水解反应正向移动, 有利于对磷酸根离子的吸附, 所以 TP 去除效果优于有机絮凝剂^[24]。当 $pH > 7.5$ 时, 复合絮凝剂 (CF) 对 COD、TAN 和 TP 的去除率均具有优势, 去除率分别达 67.66%、45.01% 和 83.21%。在 COD 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF)。在 TP 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 无机絮凝剂 (IF) > 有机絮凝剂 (OF)。这可能是因为初始 pH 较高时, 铝盐和铁盐水解产生的氢氧化物胶体具有较大的比表面积和较强的吸附能力, 可以有效吸附废水中有机物和磷酸盐等污染物^[23]。在 TAN 去除方面, 不同种类絮凝剂的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF) > 无机絮凝剂 (IF)。在高 pH 下, 溶液体系中大量游离的氢氧根离子一方面会中和无机絮凝剂上的金属离子, 一方面增大悬浮物颗粒表面的 zeta 电位值, 颗粒表面静电斥力进一步增大, 以至于絮体的絮凝效率降低^[25], 因此, 无机絮凝剂的 TAN 去除率低于有机絮凝剂。

整体来看, 复合絮凝剂在各指标上均展现出一定优势。这是由于复合絮凝剂是由多种单一絮凝剂组合而成, 这些单一絮凝剂具有不同的性质和优势, 合理组合后可以充分发挥其长处, 拓宽其应用条件,



COD: 化学需氧量; TAN: 氨氮; TN: 总氮; TK: 总钾; n: 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。COD: chemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TN: total nitrogen; TK: total potassium; n: sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 3 不同种类絮凝剂对猪粪水和牛粪水中污染物和养分去除率的平均效应值和 95% 的置信区间

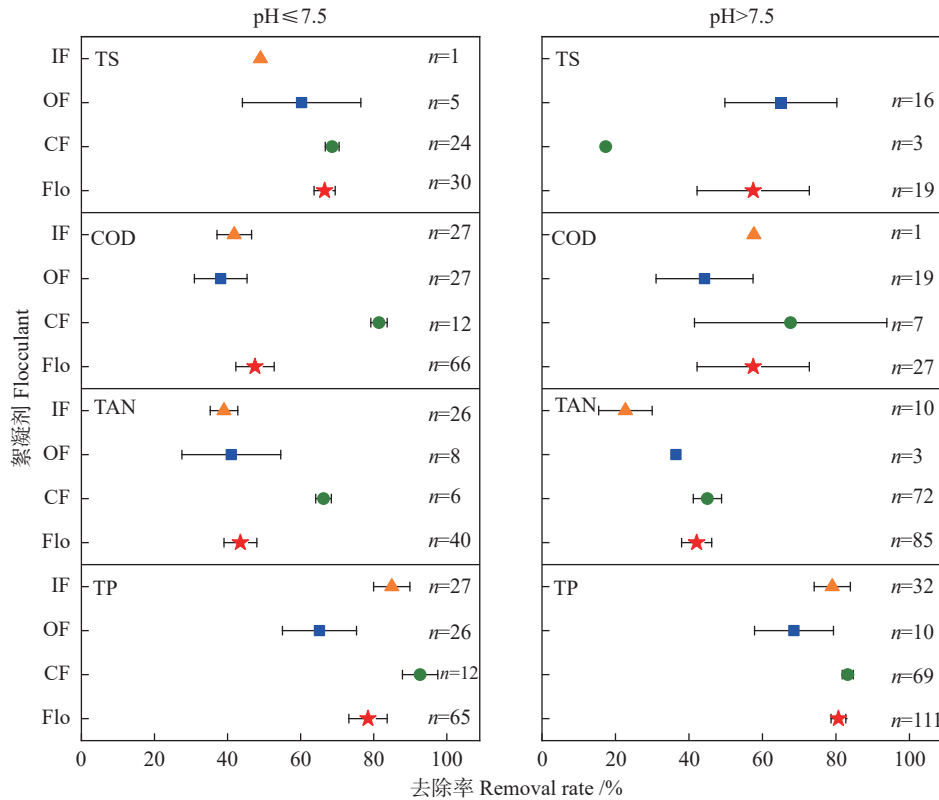
Fig. 3 Average effect size and 95% confidence interval of the removal rate of different types of flocculants on the pollutant and nutrient in pig and cattle manure wastewater

从而提高整体的去除效率。复合絮凝剂的组成决定了其较好的絮凝效果,复合絮凝剂链上的酰胺基团和颗粒表面形成氢键,在多价金属离子的参与下形成离子键,有助于悬浮物的吸附^[26]以及 COD、TAN 和 TP 的去除,所以在较大的酸碱度区间内均具有良好效果。另外,多数絮凝剂在 pH>7.5 时对养殖粪水中 TS、COD、TAN 和 TP 的去除率优于 pH≤7.5 时的去除率,说明偏碱性环境更利于絮凝技术对粪水中养分组分的去除。

2.5 养殖粪水悬浮物浓度对养分去除效果的影响

不同悬浮物含量(用 TS 表征)条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分的去除率如图 5 所示。当 TS≤5 g·L⁻¹ 时,无机絮凝剂(IF)对 TS 具有较好的去除效果,去除率可达 85.62%。不同种类絮凝剂对 TS 的去除效果表现为:无机絮凝剂(IF)>复合絮凝剂(CF)>有机絮凝剂(OF)。无机絮凝剂通过电中和的方式,吸附与自身所带电荷相反的悬浮物颗粒,而有机絮凝剂的吸附位点远高于悬浮物颗粒的数量,所以会产生自身团聚现象,进而导致聚集的颗粒重新分散,干扰颗粒沉降^[27]。有机絮凝剂对 TAN

的去除率较高,去除率可达 32.27%。不同种类絮凝剂对 TAN 的去除效果表现为:有机絮凝剂(OF)>无机絮凝剂(IF)。有机絮凝剂 TAN 去除效果最好,因为有机絮凝剂分子上可能带有正电荷或负电荷,这些电荷可以与氨氮分子上的相反电荷相互作用,通过电荷中和反应,有机絮凝剂能够降低氨氮分子表面电荷密度,从而使其失去在水中的稳定性,并促使氨氮分子聚集成较大的颗粒,这些颗粒随后可以通过沉降和过滤等方式从水中去除。复合絮凝剂对 TP 的去除率最高,为 97.58%。不同种类絮凝剂对 TP 的去除效果表现为:复合絮凝剂(CF)>无机絮凝剂(IF)>有机絮凝剂(OF)。粪水中的 TP 可能带有负电荷,复合絮凝剂中的阳离子成分可以中和这些负电荷,降低颗粒间的排斥力,促进颗粒聚集,而且复合絮凝剂的加入可能会改变水的 pH,优化絮凝条件,使得 TP 更容易通过絮凝作用被去除。当 TS>5 g·L⁻¹ 时,有机絮凝剂对 TS 的去除具有一定优势,去除率可达 66.02%。有机絮凝剂分子链长,絮凝力大,结构优良,易于分离,具有很好的吸附架桥特性。絮体粒径的大小会随着悬浮物浓度的升高而变大,



TS: 总固体; COD: 化学需氧量; TAN: 氨氮; TP: 总磷; n: 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。 TS: total solids; COD: chemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TP: total phosphorus; n: sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 4 不同 pH 条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分去除率的平均效应和 95% 的置信区间

Fig. 4 Average effect size and 95% confidence interval of the removal rate of pollutant and nutrient under different pH conditions by different types of flocculants on livestock manure wastewater

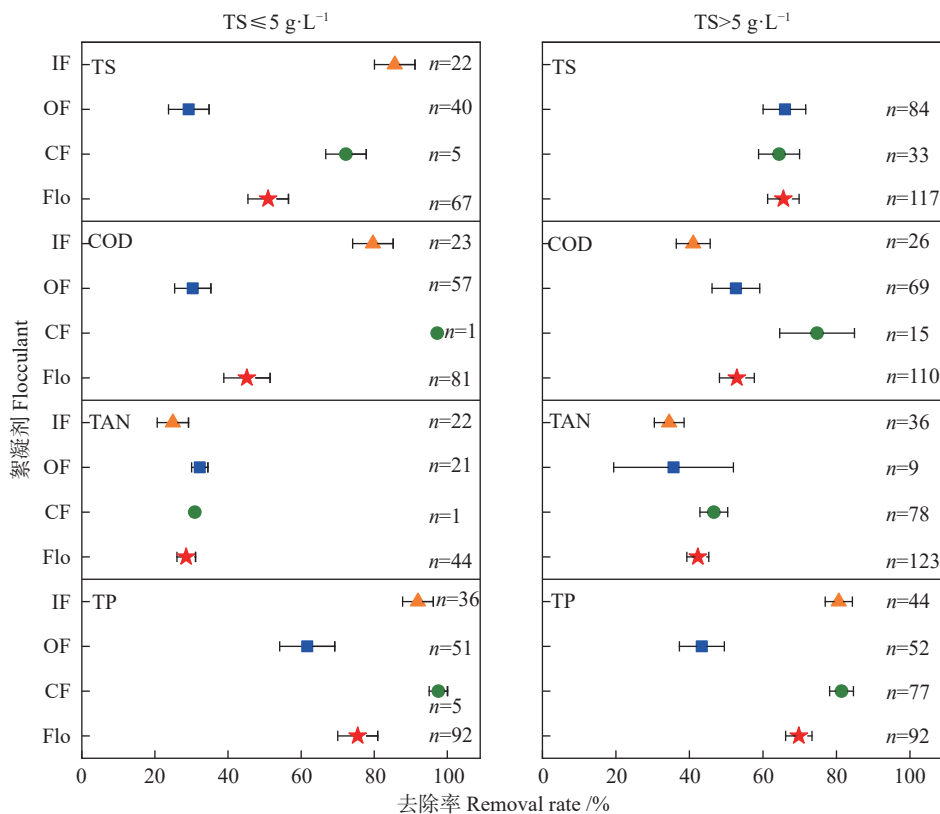
絮凝沉降的效果会更好。另外, 粪水初始悬浮物浓度较高, 分子吸附性更强, 网状结构更易形成, 对絮凝有利, 进而更加有利于粪水中悬浮物去除率的提高^[28]。不同种类絮凝剂对 COD 和 TAN 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF)>有机絮凝剂 (OF)>无机絮凝剂 (IF)。对 TP 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF)>无机絮凝剂 (IF)>有机絮凝剂 (OF)。可能是因为复合絮凝剂作为有机高分子絮凝剂和无机絮凝剂的集合体, 既可以发挥有机高分子絮凝剂的粘结、架桥和网捕作用, 导致杂质颗粒一同下沉, 从而使水体中的悬浮颗粒物脱稳聚集而发生絮凝沉降作用, 又可以发挥无机絮凝剂的电中和作用, 使溶液中的残余磷酸根离子吸附在颗粒物表面随絮凝沉降作用一起分离除去, 最终提高复合絮凝剂对水中 TP 的去除效率^[29]。

从养殖粪水 TS 整体角度分析, 由絮凝剂对不同 TS 含量下养殖粪水中 TS、COD、TAN、TP 的去除效果可知, 在较高 TS 浓度下, 絮凝剂的使用对养殖粪水中 TS、COD 和 TAN 均具有较高的去除率, 絮

凝剂在较高 TS 浓度的养殖粪水中具有更好的分离效果。这可能是由于粪水初始 TS 浓度较高时, 粪水中的微细粒含量也较高, 絮体的粒径大小会随 TS 浓度的增加而变大, 这些微粒往往聚集成大型絮团, 絮凝沉降的效果也越好。

2.6 养殖粪水 COD 浓度对养分去除效果的影响

不同化学需氧量条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分的去除率如图 6 所示。当 COD ≤ 10 g·L⁻¹ 时, 无机絮凝剂 (IF) 对 COD 和 TP 的去除率最高, 分别达 80.51% 和 87.15%。不同种类絮凝剂对 COD 和 TP 的去除效果表现为: 无机絮凝剂 (IF)>复合絮凝剂 (CF)>有机絮凝剂 (OF)。这可能是因为无机絮凝剂中含有的正电荷与悬浮物所携带的负电荷进行了电中和, 从而去除了悬浮物, 同时也去除了附着在悬浮物上的有机物; 磷酸根和无机絮凝剂中的金属阳离子形成羟基磷酸盐沉淀^[29], TP 的去除效果较好。复合絮凝剂 (CF) 对 TAN 的去除率最高, 可达 43.92%。不同种类絮凝剂对 TAN 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF)>有机絮凝剂 (OF)>无机絮凝



TS: 总固体; COD: 化学需氧量; TAN: 氨氮; TP: 总磷; n: 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。 TS: total solids; COD: chemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TP: total phosphorus; n: sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 5 不同总固体 (TS) 含量条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分去除率的平均效应值和 95% 的置信区间
Fig. 5 Average effect sizes and 95% confidence intervals of the removal rates of pollutants and nutrients by different types of flocculants under different total solids (TS) contents for livestock manure wastewater

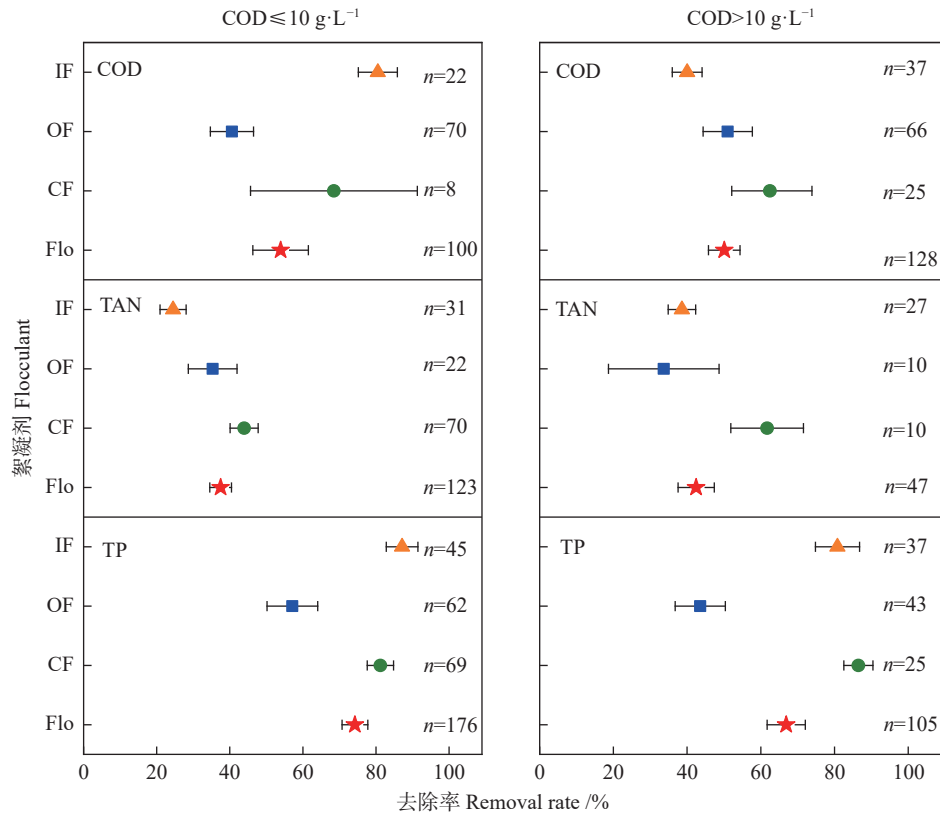
剂 (IF)。复合絮凝剂对 TAN 的去除效果最好, 可能是因为复合絮凝剂通过为反硝化菌提供更多附着位点提高反硝化速率, 氮元素更易于被转化成 N_2 排出水体, 从而提高 TAN 的去除率^[30]。当 $COD > 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 复合絮凝剂 (CF) 对 COD、TAN 和 TP 的去除率均最优, 分别可达 62.49%、61.72% 和 86.68%。不同种类絮凝剂对 COD 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF) > 无机絮凝剂 (IF); 对 TAN 和 TP 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 无机絮凝剂 (IF) > 有机絮凝剂 (OF)。复合絮凝剂具有更多的悬浮物附着位点, 可以通过吸附作用捕获污染物^[30]。复合絮凝剂在静电吸附、氢键和离子键的作用下将固体物质吸附在长链上^[31], 从而提高了 COD 的去除率。悬浮物的沉降使其孔隙水中的 TAN 迅速释放到水中, 在微生物的作用下进行氮转化, 生成亚硝酸盐, 进一步转化为硝酸盐; 悬浮物的沉降也会使孔隙水中的有机氮暴露于水体有氧环境中, 加速有机氮矿化, 从而向水中释放 TAN^[30], 为反硝化菌提供充足的附着位点, 将 TAN 转化成 N_2 排出水体。磷酸根离子

可以与复合絮凝剂所携带的阳离子结合, 从而提高水中 TP 的去除率。

从养殖粪水整体进行分析, 复合絮凝剂对 TAN 的去除更具优势, 且在高浓度 COD 废水中具有更高的去除率。这可能是由于大量污染物附着在絮凝剂表面电荷构成的吸附位点和架桥位点上, 减少了絮凝剂本身的团聚现象。此外, 有机质为微生物提供了充分的有机碳源, 进而促进其生长繁殖, 因此, 氨氮去除率随 COD 浓度的升高而升高^[32]。在高 COD 浓度的废水中, 复合絮凝剂具有优势, 因此, 更适合应用于高 COD 浓度废水中。

2.7 粪水初始 TAN 浓度对养分分离效果的影响

不同氨氮含量条件下不同种类絮凝剂对粪水中污染物和养分的去除率如图 7 所示。当 $TAN \leq 0.9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 无机絮凝剂 (IF) 对粪水 TP 的去除率最高, 达到 82.86%。复合絮凝剂 (CF) 对粪水中的 COD 和 TAN 具有最优的去除效果, 去除率分别可达 66.83% 和 44.12%。不同种类絮凝剂对 COD 和 TAN 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF) > 无



COD: 化学需氧量; TAN: 氨氮; TP: 总磷; n: 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。COD: chemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TP: total phosphorus; n: sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 6 不同化学需氧量条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分去除率的平均效应值和 95% 的置信区间

Fig. 6 Average effect sizes and 95% confidence intervals of the removal rates of pollutants and nutrients under different chemical oxygen demand conditions by different types of flocculants on livestock manure wastewater

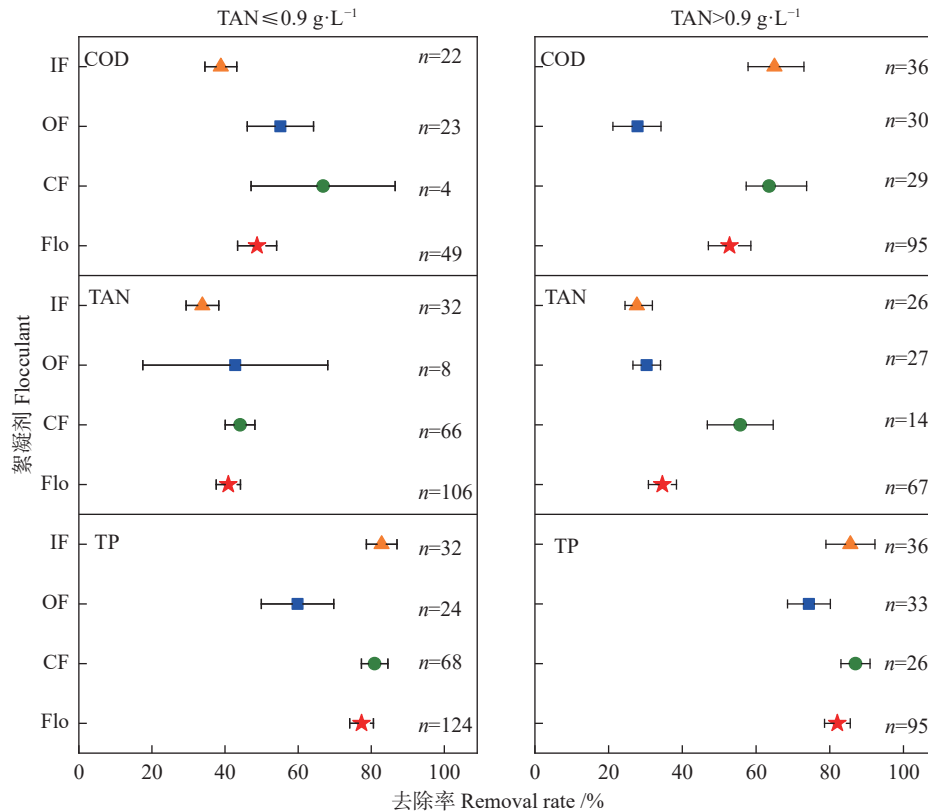
机絮凝剂 (IF)。这可能是因为复合絮凝剂具有更多的附着位点, 从而保证了污染物和微生物的附着。TP 的去除效果表现为: 无机絮凝剂 (IF) > 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF)。这可能是因为无机絮凝剂会产生足够的氢氧化物胶体吸附去除水中的磷酸盐^[33]。TAN > 0.9 g·L⁻¹ 时, 无机絮凝剂 (IF) 和复合絮凝剂 (CF) 对 COD 的去除效果差别较小, 去除率分别为 64.99% 和 63.54%; 二者对 TP 的去除效果差别也较小, 去除率分别为 85.60% 和 86.99%。不同类型絮凝剂对 COD 和 TP 去除效果表现为: 无机絮凝剂 (IF) ≈ 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF)。复合絮凝剂 (CF) 对 TAN 具有最优的去除效果, 去除率为 55.71%。不同类型絮凝剂对 TAN 的去除效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF) > 无机絮凝剂 (IF)。初始氨氮浓度较高时, 反应生成的絮体逐渐增多, 微小的絮体之间相互碰撞和聚集的概率增加, 形成较大的颗粒状沉淀^[34], 在复合絮凝剂多种机制的共同作用下, 反应速率和去除率明显提高。

从整体分析, 絮凝剂的使用对于高氨氮含量条

件下养殖粪水中 COD、TAN 和 TP 的去除优势微乎其微, 不同絮凝剂对 3 个指标去除效果的差异不大, 说明养殖粪水氨氮浓度不会对絮凝剂的使用效果造成过多影响。这可能是因为絮凝剂通过形成桥接或网络结构来絮凝颗粒, 而这一过程不直接依赖于氨氮浓度。

2.8 粪水中初始 TP 浓度对养分分离效果的影响

不同总磷含量条件下不同种类絮凝剂对粪水中污染物和养分的去除率如图 8 所示。当 TP ≤ 0.15 g·L⁻¹ 时, 无机絮凝剂 (IF) 对 TS 和 TP 具有最优的去除率, 分别为 85.09% 和 87.54%。有机絮凝剂 (OF) 对 TAN 的去除率最高, 可达 99.20%。复合絮凝剂 (CF) 对 COD 的去除率最高, 可达 97.25%。不同类型絮凝剂对 TS 和 TP 的去除效果表现为: 无机絮凝剂 (IF) > 复合絮凝剂 (CF) > 有机絮凝剂 (OF)。这是因为在低总磷含量的污水中, 无机絮凝剂中具有足够的金属阳离子, 与磷酸根反应生成羟基磷酸盐沉淀, 因此 TP 去除效果显著^[35]。对于 COD 的去除效果表现为: 无机絮凝剂 (IF) > 有机絮凝剂 (OF)。对于 TAN 的去除



COD: 化学需氧量; TAN: 氨氮; TP: 总磷; n : 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。COD: chemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TP: total phosphorus; n : sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 7 不同氨氮含量条件下不同种类絮凝剂对粪水中污染物和养分去除率的平均效应值和 95% 的置信区间

Fig. 7 Average effect sizes and 95% confidence intervals of the removal rates of pollutants and nutrients under different ammonia nitrogen conditions by different types of flocculants on livestock manure wastewater

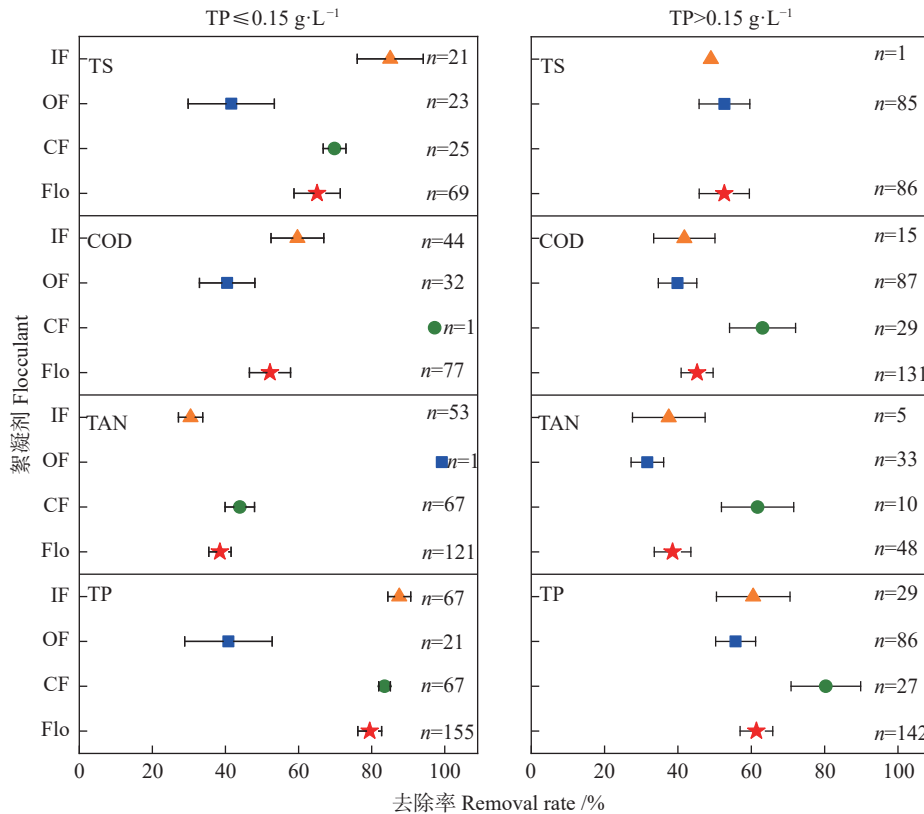
效果表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 无机絮凝剂 (IF)。当 $TP > 0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 复合絮凝剂 (CF) 对 COD、TAN 和 TP 均具有较好的去除效果, 去除率分别达 63.08%、61.72% 和 80.33%。不同类型絮凝剂对 COD、TAN 和 TP 的去除率表现为: 复合絮凝剂 (CF) > 无机絮凝剂 (IF) > 有机絮凝剂 (OF)。研究表明, 污染物附着于固体颗粒^[30], 磷酸根通过离子键的作用吸附悬浮物^[24], 因此, 三者去除效率具有相关性。当磷酸盐离子的浓度超过一定限度, 单一絮凝剂的絮凝能力已经耗尽, 而复合絮凝剂仍可起到桥接作用, 形成粒子-聚合物, 提高 COD、TAN 和 TP 的去除率。

从养殖粪水 TP 整体角度分析, 絮凝剂的使用对 TS、COD、TAN 和 TP 的去除效果表现为: 在较低的总磷含量条件下, 絮凝剂的使用对 TS、COD 和 TP 的去除均具有相对较好的效果。TP 浓度对絮凝剂使用后 TAN 去除效果的影响较小。

3 结论

本文采用 Meta 分析方法, 分析了养猪和养牛粪

水的水质特征, 研究了絮凝剂类型对粪水中污染物和养分的去除率, 探究了使用不同絮凝剂时粪水初始 pH、总固体浓度、化学需氧量浓度、氨氮浓度和总磷浓度对污染物和养分去除效果的影响。研究结果表明, 由于畜禽饲料种类、消化方式和养殖场清粪工艺的不同, 养猪和养牛粪水水质具有显著差异。整体来看, 絮凝剂投入对养殖粪水中污染物和养分的去除具有显著效果, 然而废水类型对絮凝剂去除效果的影响不显著。在全部酸碱度区间内, 复合絮凝剂 (CF) 对各指标去除率均展现出显著优势。在较大的总固体含量浓度范围内, 复合絮凝剂 (CF) 对养殖粪水中化学需氧量 (COD) 和总磷的去除率更高, 有机絮凝剂 (OF) 对氨氮的去除率较高。在较低化学需氧量条件下 ($COD \leq 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 絮凝剂的使用对化学需氧量和总磷的去除效果更好; 在较高化学需氧量条件下 ($COD > 10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 絮凝剂的使用对氨氮的去除效果更好。絮凝剂的使用对高氨氮含量条件下养殖粪水中化学需氧量、氨氮和总磷的去除具有一定优势, 但效果并不明显。对于不同总磷含量条件, 复



TS: 总固体; COD: 化学需氧量; TAN: 氨氮; TP: 总磷; n: 样本数量; IF: 无机絮凝剂; OF: 有机絮凝剂; CF: 复合絮凝剂; Flo: 所有絮凝剂。TS: total solids; COD: chemical oxygen demand; TAN: ammonia nitrogen; TP: total phosphorus; n: sample size; IF: inorganic flocculant; OF: organic flocculant; CF: composite flocculant; Flo: total flocculant.

图 8 不同总磷含量条件下不同种类絮凝剂对养殖粪水中污染物和养分去除率的平均效应值和 95% 的置信区间

Fig. 8 Average effect sizes and 95% confidence intervals of the removal rates of pollutants and nutrients under different total phosphorus conditions by different types of flocculants on livestock manure wastewater

合絮凝剂 (CF) 对化学需氧量的去除效果均具有优势, 在较低总磷含量条件下, 絮凝剂使用对于总固体、化学需氧量和总磷的去除均有相对较好的效果 (去除率 > 50%)。因此, 在处理养殖粪水中污染物和养分分离问题时, 鉴于不同种类絮凝剂和复配配方效果的差异性, 需要针对粪水水质特征和应用场景开展相应的絮凝方案设计。

4 展望

絮凝剂絮凝效果主要受絮凝剂本身性质和使用条件的影响。无机絮凝剂絮凝效果主要依赖于铁离子和铝离子水解形态和含量; 有机絮凝剂絮凝效果主要受电性、分子量和离子度等性质的影响; 复合絮凝剂絮凝效果主要受其中单一絮凝剂性质、絮凝剂添加顺序和搭配方式的影响。除絮凝剂本身的特性之外, 添加量、外界温度、处理工艺 (絮凝过程的前处理和絮凝后的固液分离方式)、水力条件 (如搅拌速率和时间以及沉降时间)、粪水特征 (如悬浮物浓度、氮磷钾含量和水质 pH 等) 以及一些其他因素

也会影响絮凝剂的絮凝效果, 所以在试验过程中要尽可能全面地考虑。本文仅考虑了粪水水质对絮凝效果的影响, 后续研究应进一步研究其他方面因素。

目前, 生产中常用的絮凝剂主要包括无机絮凝剂、有机絮凝剂和复合絮凝剂, 其在使用过程中均具有一定局限性。无机絮凝剂包括硫酸铝、聚合氯化铝和氯化铁等, 其中, 铁盐因低成本、絮凝速度快和 pH 适用范围广等特点得到广泛关注, 但铁盐会加速对金属设备和结构的腐蚀。大多数有机高分子絮凝剂 (如聚丙烯酰胺等) 本身或其水解产物具有毒性, 因此, 其使用受到一定限制^[36]。复合絮凝剂以其效率高和添加量小的优势脱颖而出, 但其应用仍受处理工艺和水力条件等多种因素的影响, 且目前相关研究尚不全面。因此, 未来针对复合絮凝剂可以在以下几个方面开展更广泛的研究。1) 复合絮凝剂的应用范围更广, 对使用条件没有严格限制, 应继续开发复合絮凝剂在不同场景中的应用, 并精确使用剂量与方法, 以确保其效能最大化。2) 目前已有学者在研发和探生物絮凝剂, 其絮凝剂效果良好, 但成本

较高,因此,其应用受到一定限制。当前使用的复合絮凝剂多为无机-有机复合絮凝剂,若能将生物絮凝剂融入复合絮凝剂中,将有望大幅减少絮凝剂的整体用量,在增加环境效益的同时,不过度增加成本,这也是未来值得研究的方向。3) 目前对复配絮凝剂的研究多聚焦于使用效果,未来应更加深入地探究其机制。具体而言,应根据使用目标对复合絮凝剂的配比和结构等进行进一步的优化和调整,以实现更高效和更环保的絮凝效果。

参考文献 References

- [1] OECD, Food and Agriculture Organization of the United Nations. OECD-FAO Agricultural Outlook 2021—2030[R]. Paris: OECD Publishing, 2021: 163–177
- [2] 刘春, 刘晨阳, 王济民, 等. 我国畜禽粪便资源化利用现状与对策建议[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(2): 35–43
LIU C, LIU C Y, WANG J M, et al. The current situation of resource utilization of livestock and poultry manure in China and the countermeasures and suggestions[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(2): 35–43
- [3] 马艳茹, 孟海波, 沈玉君, 等. 粪水酸化储存还田应用效果[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 245–251
MA Y R, MENG H B, SHEN Y J, et al. Application effect of the acidification storage of animal slurry returning to field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 245–251
- [4] 吴鹏, 张锐, 范欣竹, 等. 微生物絮凝剂提取方法的优化及其对废水中木质纤维类污染物的絮凝机理[J]. 环境工程学报, 2022, 16(1): 343–354
WU P, ZHANG R, FAN X Z, et al. Optimization of the extraction method of the biofloculant and its application in lignocellulosic waste-containing water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(1): 343–354
- [5] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. 中国政府网. [2020-06-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The second national pollution source census bulletin[EB/OL]. Chinese Government Website. [2020-06-08]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm
- [6] 蒋艳红, 李安玉, 严发, 等. 载镁香蕉秆基生物炭对氮磷的吸附性能研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 559–567
JIANG Y H, LI A Y, YAN F, et al. Research on adsorption properties of Mg-loaded banana stalk biochar on nitrogen and phosphorus[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(6): 559–567
- [7] LEE C S, ROBINSON J, CHONG M F. A review on application of flocculants in wastewater treatment[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2014, 92(6): 489–508
- [8] FRAGOSO R A, DUARTE E A, PAIVA J. Contribution of coagulation–flocculation process for a more sustainable pig slurry management[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(5): 131
- [9] GARCIA M C, VANOTTI M B, SZOGI A A. Simultaneous separation of phosphorus sludge and manure solids with polymers[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(6): 2205–2215
- [10] ZHANG R H, LEI F. Chemical treatment of animal manure for solid-liquid separation[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(4): 1103–1108
- [11] PAZ PÉREZ-SANGRADOR M, CRISTINA LEÓN-CÓFRECES M, ACÍTORES-BENAVENTE M, et al. Solids and nutrient removal from flushed swine manure using polyacrylamides[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93(1): 67–70
- [12] AGUIRRE-VILLEGAS H A, LARSON R A, SHARARA M A. Anaerobic digestion, solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 134059
- [13] FUCHS W, DROSG B. Assessment of the state of the art of technologies for the processing of digestate residue from anaerobic digesters[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(9): 1984–1993
- [14] HJORTH M H, CHRISTENSEN K V, CHRISTENSEN M L, et al. Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice[M]//LICHTFOUSE, HAMELIN M, NAVARRETE M, et al. Sustainable Agriculture Volume 2. Dordrecht: Springer, 2011
- [15] REGUEIRO I, COUTINHO J, GIOELLI F, et al. Acidification of raw and co-digested pig slurries with alum before mechanical separation reduces gaseous emission during storage of solid and liquid fractions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 227: 42–51
- [16] 王建波, 申瑞延, 田美春, 等. 生物絮凝剂及其复配工艺对超高浓度沼液处理的研究[J]. 中国沼气, 2023, 41(5): 55–61
WANG J B, SHEN R Y, TIAN M C, et al. Study on the treatment of ultra-high concentration biogas slurry by biological flocculant and its compound process[J]. *China Biogas*, 2023, 41(5): 55–61
- [17] 贺旭德. 奶牛养殖粪水的处理与还田利用及其评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023
HE X D. Study on the treatment, return to field utilization and evaluation of dairy manure water[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023
- [18] 黄强, 朱秋风, 张卫辉, 等. 猪用非粮型饲料资源开发利用的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(4): 35–40
HUANG Q, ZHU Q F, ZHANG W H, et al. Research progress on development and utilization of non-grain-based feed resources in swine[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2020, 56(4): 35–40
- [19] 徐颖, 李柏浩, 梁浩, 等. 不同能氮水平对反刍动物瘤胃发酵的影响[J]. 饲料工业, 2024, 45(17): 70–74
XU Y, LI B H, LIANG H, et al. Effects of different energy and nitrogen levels on ruminal fermentation in ruminants[J]. *Feed*

- Industry, 2024, 45(17): 70–74
- [20] 毛艳丽, 张延凤, 罗世田, 等. 水处理用絮凝剂絮凝机理及研究进展[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008, 25(2): 78–82
MAO Y L, ZHANG Y F, LUO S T, et al. Advances in flocculation mechanisms and research of water-treatment flocculants[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2008, 25(2): 78–82
- [21] 朱彦宾, 张敬一, 许湘竹, 等. 复配絮凝剂处理养殖废水中的氨氮及总磷[J]. 经济动物学报, 2024, 28(4): 358–365
ZHU Y B, ZHANG J Y, XU X Z, et al. Treatment of ammonia nitrogen and total phosphorus in farming wastewater with compound flocculants[J]. Journal of Economic Animal, 2024, 28(4): 358–365
- [22] 姚三路. 絮凝剂和生物炭对猪场养殖废水的处理研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020
YAO S L. Study on the effect of flocculant and biochar on swine wastewater[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020
- [23] 许玲, 徐翠云, 杨建辉, 等. 不同絮凝剂除磷性能研究及经济性分析[J]. 绥化学院学报, 2021, 41(12): 145–149
XU L, XU C Y, YANG J H, et al. Study on dephosphorization performance and economic analysis of different flocculants[J]. Journal of Suihua University, 2021, 41(12): 145–149
- [24] 沈晓腾, 张海涛, 崔红玉, 等. 常见无机絮凝剂除磷效果及强化絮凝研究[J]. 广州化工, 2024, 52(6): 162–164, 210
SHEN X T, ZHANG H T, CUI H Y, et al. Effect of common inorganic flocculants on phosphorus removal and enhancement of the flocculation performance[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(6): 162–164, 210
- [25] 祝凤蕊. 无机-有机杂化高分子絮凝剂制备及其絮凝效能研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023
ZHU F R. Study on preparation and flocculation efficiency of inorganic-organic hybrid polymer flocculant[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023
- [26] HYRYCZ M, OCHOWIAK M, KRUPIŃSKA A, et al. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2022, 820: 153328
- [27] 欧启凡. 巯基化壳聚糖基絮凝剂的制备及其应用性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022
OU Q F. Preparation of thiolated chitosan-based flocculants and research on their application properties[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022
- [28] 王聪磊. 高性能三氯化铁絮凝剂的制备及应用研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023
WANG C L. Preparation and application of high performance ferric chloride flocculant [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023
- [29] 曾德芳, 徐保林. 沉淀-絮凝结合法处理磷化废水的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(5): 795–798
ZENG D F, XU B L. Study on phosphorus removal from phosphorus-containing wastewater by sedimentation-flocculation precipitation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(5): 795–798
- [30] 张鹏, 夏永秋, 刘雪梅, 等. 自然水体中悬浮物对反硝化影响的研究进展[J]. 湖泊科学, 2023, 35(1): 32–42
ZHANG L, XIA Y Q, LIU X M, et al. Effects of suspended particles on denitrification in natural water: A review[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(1): 32–42
- [31] KHAZAIE A, MAZARJI M, SAMALI B, et al. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry[J]. Water, 2022, 14(6): 918
- [32] 陈永生, 胡龙兴, 吕晓辉. COD 负荷对 MBSBBR 脱氮除磷性能的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(11): 99–101, 121
CHEN Y S, HU L X, LV X H. Effect of COD load on removal of nitrogen and phosphorus in a moving bed sequencing batch biofilm reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(11): 99–101, 121
- [33] MISHRA A, BAJPAI M. Removal of sulphate and phosphate from aqueous solutions using a food grade polysaccharide as flocculant[J]. Colloid and Polymer Science, 2006, 284(4): 443–448
- [34] 秦智峰, 王达道, 徐志峰, 等. 磷酸铵镁沉淀-絮凝法处理高浓度氨氮废水[J]. 化工环保, 2021, 41(5): 595–600
QIN Z F, WANG D D, XU Z F, et al. Treatment of high-concentration ammonia nitrogen wastewater by magnesium ammonium phosphate precipitation-flocculation[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, 41(5): 595–600
- [35] ELAZZOUI M, HABOUBI K, ELYOUBI M S. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 117: 614–626
- [36] 刘焕来, 彭喜林, 吴刚, 等. 氧化-絮凝调理改善污泥脱水性能的研究进展[J]. 三峡生态环境监测, 2023, 8(4): 13–20
LIU H L, PENG X L, WU G, et al. Research progress on improving sludge dewatering performance by oxidation-flocculation conditioning[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2023, 8(4): 13–20