

# 磁分离技术处理污水的研究现状

巩彧玄<sup>1</sup>, 张 颀<sup>2</sup>, 于博洋<sup>2</sup>, 王 鑫<sup>2</sup>, 李 明<sup>3</sup>, 闫秋良<sup>2</sup>, 高星爱<sup>2\*</sup>, 李忠和<sup>2\*</sup>

(1. 坎布里奇环保科技有限公司, 北京 100089; 2. 吉林省农业科学院, 长春 130033; 3. 吉林建筑大学市政与环境工程学院, 长春 130000)

**摘要:** 磁分离技术作为一种新型的污水处理技术, 具有效率高、用时短以及无二次污染等特点, 因此受到了极大的关注和应用。本文介绍了磁分离技术以及磁分离技术在污水处理领域应用的国内外现状。

**关键词:** 磁分离技术; 污水处理; 应用

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)05-0146-05

## Development Status of Magnetic Separation Technology for Wastewater Treatment

GONG Yuxuan<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>2</sup>, YU Boyang<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, LI Ming<sup>3</sup>, YAN Qiuliang<sup>2</sup>, GAO Xing'ai<sup>2\*</sup>, LI Zhonghe<sup>2\*</sup>

(1. Cambridge Environmental Technology, Beijing 100089; 2. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 3. School of Municipal and environmental engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130000, China)

**Abstract:** Magnetic separation technology as a new sewage treatment technology, with high efficiency, short time and no secondary pollution and other characteristics, has received great attention and application. This paper introduces the magnetic separation technology and its application in the field of sewage treatment at home and abroad.

**Key words:** Magnetic separation technology; Sewage treatment; Application

磁分离技术是在磁场中处理具有磁性物质或外加磁性后具有磁性的物质的一种处理技术, 利用元素或组分中磁性的差异, 通过外加磁场对目标物质进行处理, 能够有效地直接分离或者去除受污染水体中的具有强、弱磁性或反磁性等的污染物<sup>[1-2]</sup>。该技术的应用近些年来已经渗透到各个领域, 最早磁分离技术是应用在对高岭土、矿石等固体物质中的磁性杂质进行分离<sup>[3]</sup>。进入21世纪, 磁分离技术开始在污废水处理领域得到应用。磁分离技术是通过外加磁场力直接对污染物进行处理, 从而能够将污染物快速、高效脱离原水体系, 对原水体系无影响, 同时也不会发生化学或生物反应, 具有分离速度快、不产生二次污染、占地面积小等优点<sup>[4]</sup>。磁分离技术虽然能够高效分离或去除污

染水体中带有磁性的物质, 但水体中具有弱磁性或非磁性的目标污染物却无法直接或完全通过外加磁场的作用进行分离, 还需要提高磁场强度或添加磁种使被分离的物质具有磁性, 以达到高效去除的目的<sup>[5]</sup>。

### 1 磁分离技术的分类及应用

磁分离技术根据装置原理可分为磁凝聚分离、磁盘分离和高梯度磁分离。按照外加磁场的类型可以分为永磁分离和电磁分离(包括超导磁分离)。而对于无磁性或弱磁性的物质, 需要投加磁种使其带有磁性, 从而实现磁分离的目的。

#### 1.1 磁种

磁分离技术应用于水处理领域时, 磁性材料的种类和选择是关键。其中, 经常用到的磁种大部分为常规磁性物质, 包括磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )、铁粉以及具有磁性物质的炉渣粉等。本身不具有磁性的物质如水泥、碳酸钙等, 通过加入铁粉等具有磁性的物质来赋予其磁性。除此之外, 还包括人工合成的纳米磁性子、改性或合成的磁性颗粒和生物磁种(如趋磁细菌)等<sup>[6]</sup>。王晓云等<sup>[7]</sup>介绍了不同磁性材料的特点以及磁分离技术的作用原

收稿日期: 2020-03-26

基金项目: 吉林省科技厅重点攻关项目(20180201017SF); 吉林省农业科技创新工程项目(KYJF2021ZR114、CXGC2021DX019-21、CXGC2021TD101)

作者简介: 巩彧玄(1993-), 男, 在读硕士, 研究方向: 水处理技术与资源化。

通讯作者: 李忠和, 男, 博士, 副研究员, E-mail: lizhonghe6@126.com  
高星爱, 女, 博士, 副研究员, E-mail: 1164355468@qq.com

理,阐述了磁分离技术在环境工程领域如污水处理等方面的应用,取得了良好的应用效果。Qin等<sup>[8]</sup>在300 r/min的转速下,将氢氧化钠溶液与反应溶液混合,并通过离心得到富镍溶液以便将磁种隔离,随后清洗、烘干磁种,经过电镜扫描(SEM)与原磁种作对比,探究磁种循环利用的最优条件。实验结果证明,磁种能够高效回收,循环利用效果良好。

## 1.2 磁分离技术

磁分离技术最初主要应用于处理工业领域产生的重金属废水等<sup>[9]</sup>。近几年,磁分离技术作为一种高效的新型水处理技术已经在化工废水、炼油废水和市政污水等水处理领域得到广泛应用,并获得了良好效果。磁分离技术不仅可以去除油类、重金属和悬浮物等,在去除藻类、病原微生物和细菌等领域也有良好的应用效果<sup>[10]</sup>。

磁分离技术也可以和其他技术联合使用,不仅能够强化处理效果,而且不会带来新的污染物。如与混凝法组合处理工业废水;与超声波、红外线等物理技术组合处理锅炉废水或与微生物技术耦合处理污水等都能获得比单个技术更好的处理效果。近几年,磁分离技术应用于生物工程领域<sup>[11]</sup>,如在生物学中运用磁分离技术可以提取藻类生物所吸附的重金属元素;用于细胞DNA和RNA的排序和免疫技术的分离;也可应用于医学中,用于血液分离和提取红细胞等。Fzyazi等<sup>[12]</sup>在处理用盐基性红色染料模拟的废水时,通过化学沉淀法制备复合磁性吸附剂,对料废水中污染物的最大吸附量可达18.48 mg/g。也可以用来制作满足磁分离性质的磁性材料,如磁性表面活性剂等<sup>[13]</sup>。王晓杰等<sup>[14]</sup>应用磁絮凝-圆盘磁分离技术处理污染河水,结果表明,此项技术具有高效去除受污染河水中的TP和COD等污染物的能力。Zhang等<sup>[15]</sup>将四氧化三铁纳米粒子包覆在氟化碳膜上作为磁性吸附材料,经测定该磁性吸附材料具有良好的亲油性和疏水性,在含油废水处理中应用此材料油水分离效率高达95%。

王延强等<sup>[16]</sup>应用磁分离设备处理厨房污水,处理前污水中含油量和悬浮物的含量分别为158、280 mg/L,处理后污水中的含油量以及悬浮物的含量分别为6.2、63.2 mg/L。Zhang等<sup>[17]</sup>用3-缩水甘油氧丙基三甲氧基硅烷(GPTMS)和聚赖氨酸(P-Lys)改性得到的磁性纳米微粒(MNPs),能够有效去除废水中阴离子染料包括甲基蓝(MB)、橙黄I(OR-I)和酸性红18(AR-18)等。

张太亮等<sup>[18]</sup>使用高锰酸钾破胶剂和聚合氯化铁絮凝剂处理压裂返排液,处理后的溶液中COD、SS、油、色度和pH等主要指标均达到《国家污水综合排放标准》(GB8978-2002)中的一级排放标准。何秋杭等<sup>[19]</sup>通过磁分离技术对市政污水中碳源浓缩的可行性进行研究,结果表明,该技术能够有效回收碳,同时对市政污水中的污染物有较高的去除效率,运行中该技术装置稳定,具有良好的推广价值。Zhang等<sup>[20]</sup>以壳聚糖/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>复合粒子(CS-MCP)为吸附剂,在壳聚糖/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>复合粒子(CS-MCP)表面接枝共聚合,制备了一系列具有核-刷结构的磁性复合吸附剂,并应用于双氯芬酸钠(DCF)和盐酸四环素两种药物的脱除。Lin等<sup>[21]</sup>通过磁性纳米粒子(MNs)对水体中的微藻进行吸附分离,分离效率最高可达99%。陈钱等<sup>[22]</sup>应用新型磁分离技术处理高蛋白污水,结果表明,该技术的处理效果良好,对有机物和蛋白具有较高的去除率,而且占地面积小、效率高。Zhang等<sup>[23]</sup>将Fe-Ti双金属氧化剂涂布在四氧化三铁纳米离子表面,以此来获得具有磁性的磁性核壳纳米吸附剂,对于处理饮用水中的氟有很好的效果。王长智等<sup>[24]</sup>针对印染废水回用中存在的膜污染问题,采用混凝-磁分离澄清池工艺对印染废水生化池部分出水进行预处理,出水中COD、浊度、色度和电导率等指标均明显降低,具有较好的经济价值和环境价值。

## 1.3 高梯度磁分离技术

高梯度磁分离技术是一种物理方法,同时也是一种新型的磁分离技术,通过在过滤仪器中填充材料介质,在其周围由于外加高磁场强度的作用会产生高梯度磁场,具有不同磁性的磁性颗粒,由于磁性和磁化系数不同,会导致不同的磁性颗粒受到不同的磁场力作用,从而实现将不同磁化系数的颗粒物质进行分离的目的<sup>[25]</sup>。高梯度磁分离技术在污水处理方面同样有着巨大优势,特别是在工业废水处理方面有着巨大潜力。

Seyyedali等<sup>[26]</sup>通过高梯度磁分离技术在水体流动的状态下分离油脂,磁种为聚乙烯吡咯烷酮涂层材料,经试验测定,在0.56 T的磁场强度、1 h的絮凝时间下油脂可达85%~95%的分离效果。屈彬等<sup>[27]</sup>采用高梯度磁分离技术对高岭土原矿进行除铁增白,处理后,其含铁量为0.9%,白度可达63%。蒙臻明等<sup>[28]</sup>对高岭土原矿使用重力沉降分级和高梯度磁分离技术进行除铁,结果表明,高岭土的含铁量为0.9%,除铁率为29.69%。Zheng

等<sup>[29]</sup>在高梯度磁场利用 HGMS 回收超细弱磁性矿物,结果表明基体尺寸、料浆速度以及磁感应对捕获半径的影响较大。捕集半径随粒径的减小、基质直径的增大和泥浆速度的增加而迅速减小。Xu 等<sup>[30]</sup>对于杂岩和纯非磁性矿物颗粒的混合物提出了一种计算高梯度磁选品级和回收率等评价变量的方法。结果表明随着磁性矿物饱和以及磁化强度的增大,分离效率受高梯度磁场的影响优势逐渐减弱。Zheng 等<sup>[31]</sup>利用高梯度磁分离技术中常用的高磁导率圆柱矩阵从悬浮液中提取弱磁性微粒,通过对圆形矩阵和椭圆矩阵周围的磁场和流场进行解析计算,发现椭圆截面矩阵在高压磁流变液中具有广阔的应用前景。Cheng 等<sup>[32]</sup>运用高梯度磁分离技术对气溶胶种群中的磁性部分进行提取,结果证明,高梯度磁分离技术用来收集磁性粒子是可行的,并且具有很高的选择性,还可以调整磁性粒子的磁化率和大小。Kaveh 等<sup>[33]</sup>通过高梯度磁场对碳纳米管-聚吡咯复合材料电学性能的纳米管分离机制的影响进行研究,结果表明,通过高梯度磁分离技术产生的高梯度磁场下碳纳米管复合材料的电导率会降低。张琳等<sup>[34]</sup>在进行船舶压载水的预处理工艺时,采用高梯度磁分离装置。实验证明,高梯度磁分离压载水处理的磁种投加量约为 400 mg/L,流量不大于 10 L/h,磁场强度应不小于 12.7 mT,此时浊度的去除效果可达到 5 NTU 以下。赵亮等<sup>[35]</sup>利用高梯度磁分离技术控制钢铁企业排放烟(粉)尘中的污染颗粒物,结果表明,高梯度磁分离技术能够有效控制钢铁企业排放烟(粉)尘中的污染颗粒物,特别是对于控制 PM 10 和 PM 2.5 效果明显。

#### 1.4 絮凝-磁分离技术

絮凝-磁分离技术是近些年水处理领域中较热门的新型污水处理技术。该技术通过在水中投加絮凝剂、助凝剂的同时投加具有磁性的磁种,使水中的悬浮物能够在磁种表面凝聚,形成以絮凝团的中心为磁种形成的磁核。与传统絮凝工艺相比,絮凝-磁分离技术形成带有磁核的絮凝团,密度大,沉降速度更快,可以达到快速固液分离的目的,从而高效去除污染物<sup>[36]</sup>。Chen 等<sup>[37]</sup>制备了一种新型纳米磁性微粒-聚合硫酸铁复合絮凝剂,该絮凝剂能够在絮凝体形成阶段诱导其结构和形态特征,使其更大、更质密,能够缩短絮凝时间,大大提升色度去除效果。

絮凝-磁分离技术还可以用来收获污水中的藻类。研究发现,对裸磁性纳米材料进行修饰时

采用阳离子官能团等方式,通常利用“附着”或“固定化”两种方式将修饰磁性纳米材料的官能团附着在磁性材料表面,能够提高收获效率<sup>[38]</sup>。Bauer 等<sup>[39]</sup>加入磁场培养小球藻来刺激细胞生长。近年来,修饰磁性材料大多都会采用“固定化”的方法,用这种方法微藻收获效率达 90% 以上。同时,也可以通过加入磁场的方式提升微藻性能。絮凝-磁分离技术也可以用于收获其他物质,如 Hena 等<sup>[40]</sup>通过磁絮凝收获培养基中的布鲁氏菌,收获效率高达 99%。Zhang 等<sup>[41]</sup>应用磁絮凝技术处理煤矿废水,实验证明,煤矿废水在经过该技术处理后能够达到排放标准,且具有高效率、成本低等特点,对煤矿废水中污染物的去除能达到节能降耗的目标。

在絮凝-磁分离技术作用机理方面,Alimi 等<sup>[42]</sup>通过絮凝-磁分离技术对碳酸钙的成核机理进行研究,结果表明,通过投加磁种,有助于吸附聚集胶体颗粒,从而加快晶体的生长和沉降;Fathi<sup>[43]</sup>等应用絮凝-磁分离技术处理硬水碳酸钙垢,结果表明,该技术能够抑制硬水碳酸钙垢的生长,可应用于家庭和工业设备的防结垢处理;胡家玮等<sup>[44]</sup>对不同絮凝团的结构进行分析,通过扫描电镜发现,包裹磁种的絮凝团体积大、结构紧密,在絮凝时投加磁种有助于絮体的形成。Tang 等<sup>[45]</sup>研究了影响絮凝-磁分离技术中絮凝过程的因素,结果表明,絮凝剂和磁种起到了关键性的作用,以  $Fe_3O_4$  为主要成分的磁种效果好;PAC 具有较好的絮凝效果,同时搭配不同的磁种与絮凝剂来改变水溶液的稳定性,使溶液脱稳,加快絮凝反应进程,使污水处理更加高效。絮凝剂在磁絮凝的过程中起到非常重要的作用,L 等<sup>[46]</sup>研制了磁絮凝过程中的新型 TPPA 阳离子絮凝剂,在磁絮凝过程中产生密度大的絮凝体,沉降速度快,能够有效处理高浊度污水。Liu Y 等<sup>[47]</sup>研制了絮凝-磁分离技术中的 TPADs 阳离子高分子絮凝剂,能够在较宽的 pH 值范围内良好去除浊度,当新型阳离子絮凝剂的添加量为 6 mg/L 时,获得了最佳的絮凝效果(93.79% 的 TRE 和 0.08 的  $UV_{254}$ )。

## 2 结论及展望

磁分离技术具有高效、操作便捷、易于进行设备管理和维护等优点,适合于各类污水的处理,是未来水处理领域值得研究的一项重要技术。随着磁分离技术不断发展,其应用范围将进一步扩

大。但还存在一些亟待研究的问题:(1)目前对于磁分离技术在水处理过程中的应用研究还相对较少,但随着高梯度磁分离以及超导磁分离等新型高效技术与设备的研究与发展,未来的磁分离技术将会在水处理领域大有作为,与其他技术的耦合共同处理也是未来发展的一个重要方向。但随着技术的发展,磁分离技术的优越性将会越来越显著,同时也会得到更多关注与应用。(2)在磁分离过程中,磁种作为一个关键因素,其回收和重复利用极为重要,影响着磁分离技术的成本和磁分离效率的高低。因此,新型磁种的研发和磁种的回收及重复利用技术也是未来需要解决的问题。

### 参考文献:

- [ 1 ] Zhao Y, Xi B, Li Y, et al. Removal of phosphate from wastewater by using open gradient superconducting magnetic separation as pretreatment for high gradient superconducting magnetic separation[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 86: 255-261.
- [ 2 ] LI L, CHEN Y, YIN L, et al. Application and Prospect of Magnetic Separation Technology in the Treatment of Heavy Metal Wastewater[J]. Water Pollution and Treatment, 2015, 2: 40-45.
- [ 3 ] 吕 森. 磁介质强化混凝处理城市河道水的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [ 4 ] Luo L, Nguyen A V. A review of principles and applications of magnetic flocculation to separate ultrafine magnetic particles[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 172:85-99.
- [ 5 ] 郑利兵, 佟 娟, 魏源送, 等. 磁分离技术在水处理中的研究与应用进展[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3103-3117.
- [ 6 ] 柴社居, 庄国锋, 尼亚琼. 磁种絮凝技术在水处理中的研究进展[J]. 广州化工, 2016, 44(16): 3.
- [ 7 ] 王晓云, 车向然. 磁性物质及磁分离技术在环境工程中的应用[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(23): 5.
- [ 8 ] Yiqin Qin, Xiao Xiao, Ziwei Ye, et al. Research on magnetic separation for complex nickel deep removal and magnetic seed recycling[J]. Environ Sci Pollut Res, 2017, 24: 9294-9304.
- [ 9 ] 奥艳文. 超磁分离技术在矿井水处理中的应用[J]. 山西化工, 2019, 39(2): 137-138, 151.
- [ 10 ] 韦学玉, 刘志刚, 徐晓平. 磁生化效应力水处理技术的应用研究概况[J]. 市政技术, 2016, 34(6): 133-136.
- [ 11 ] 康 路, 胡 平, 杨 军, 等. 磁性纳米四氧化三铁在生物医学中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(21): 132-136, 144.
- [ 12 ] Fayazi M, Afzali D, Taher M A, et al. Removal of Safranin dye from aqueous solution using magnetic mesoporous clay: Optimization study[J]. Journal of Molecular Liquids, 2015, 212: 675-685.
- [ 13 ] Brown P, Hatton T A, Eastoe J. Magnetic surfactants[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2015(20): 140-150.
- [ 14 ] 王晓杰, 董文艺, 王宏杰, 等. 磁絮凝工艺处理受污染河水研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(5): 75-78, 83.
- [ 15 ] F Asgari, R Sabbagh. Synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles onto fluorinated carbon fabrics for contaminant removal and oil-water separation[J]. Separation & Purification Technology, 2017, 174:312-319.
- [ 16 ] 王廷强. 混凝磁分离技术净化厨房污水[J]. 广东化工, 2016, 43(13): 158-159.
- [ 17 ] Zhang Y R, Su P, Huang J, et al. A magnetic nanomaterial modified with poly-lysine for efficient removal of anionic dyes from water[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 262:313-318.
- [ 18 ] 张太亮, 欧阳铖, 郭 威, 等. 混凝-磁分离-电化学技术处理压裂返排液研究[J]. 工业水处理, 2016, 36(4): 37-41.
- [ 19 ] 何秋杭, 金正宇, 宫 徽, 等. 基于强化磁分离的市政污水碳源浓缩技术研究[J]. 水处理技术, 2018, 44(10): 114-118.
- [ 20 ] Zhang S, Dong Y, Yang Z, et al. Adsorption of pharmaceuticals on chitosan-based magnetic composite particles with core-brush topology[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 304: 325-334.
- [ 21 ] Z Lin, Y F Xu, Z Zhen, et al. Application and reactivation of magnetic nanoparticles in *Microcystis aeruginosa* harvesting[J]. Bioresource Technology, 2015, 190: 82-88.
- [ 22 ] 陈 钱, 袁 军, 张富青. 一种新型磁分离技术装备及其在高蛋白废水中的应用试验[J]. 山东化工, 2018, 47(18): 164-166.
- [ 23 ] Zhang C, Chen L, Wang T J, et al. Synthesis and properties of a magnetic core-shell composite nano-adsorbent for fluoride removal from drinking water[J]. Applied Surface Science, 2014, 317: 552-559.
- [ 24 ] 王长智, 任旭锋, 梅荣武, 等. 加载混凝澄清池在印染废水双膜法回用工程中的应用[J]. 水处理技术, 2016, 42(2): 129-132.
- [ 25 ] Eisentr Ger A, Vella D, Griffiths I M. Particle capture efficiency in a multi-wire model for high gradient magnetic separation[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(3): 033508.
- [ 26 ] Seyyedali M, Armin D E, Bo Cai, et al. Application of high gradient magnetic separation for oil remediation using polymer-coated magnetic nanoparticles[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 179: 328-334.
- [ 27 ] 屈 彬, 柯善军. 高岭土梯度磁分离除铁的研究[J]. 陶瓷, 2016(9): 33-37.
- [ 28 ] 蒙臻明, 柯善军, 祝乐民, 等. 高岭土原矿除铁工艺的研究[J]. 陶瓷, 2017(6): 50-56.
- [ 29 ] Xiayu Zheng, Yuhua Wang, Dongfang Lu. Study on capture radius and efficiency of fine weakly magnetic minerals in high gradient magnetic field[J]. Minerals Engineering, 2015, 74: 79-85.
- [ 30 ] Jianwu Z, Luzheng C, Ruoyu Y, et al. Centrifugal high gradient magnetic separation of fine ilmenite[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 168: 48-54.
- [ 31 ] Zheng X, Wang Y, Lu D. Investigation of the particle capture of elliptic cross-sectional matrix for high gradient magnetic separation[J]. Powder Technology, 2016, 297: 303-310.
- [ 32 ] Cheng, Murphy, Bart L, et al. On the use of high-gradient magnetic force field in capturing airborne particles[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 120: 22-31.
- [ 33 ] Kazemikia K, Bonabi F, Asadpoorchallo A, et al. Effect of

- High-Gradient Magnetic Field on Electrical Property of Carbon Nanotube-Polypyrrole Composite; Nanotube Separation Mechanism[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2018, 31: 327-336.
- [34] 张琳,余雅旋,吴仁智,等.高梯度磁分离预处理船舶压载水实验研究[J].广东化工,2017,44(17):69-71.
- [35] 赵亮,邓堃,孙文强,等.用高梯度磁分离技术控制钢铁企业颗粒物的分析[J].冶金能源,2016,35(2):59-64.
- [36] Yang L, Fu Q, Fu H. Preparation of novel hydrophobic magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/waterborne polyurethane nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(15): 48546.
- [37] Xiaoyue Chen, Huaili Zheng. Magnetic flocculation of anion dyes by a novel composite coagulant[J]. Desalination and Water Treatment, 2019, 143: 282-294.
- [38] Wang S K, Wang F, Stiles A R, et al. Botryococcus braunii cells: Ultrasound-intensified outdoor cultivation integrated with in situ magnetic separation[J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 376-382.
- [39] Bauer L M, Costa J A V, Da Rosa A P C, et al. Growth Stimulation and Synthesis of Lipids, Pigments and Antioxidants with Magnetic Fields in Chlorella Kessleri Cultivations[J]. Bioresource Technology, 2017, 244(2): 1425-1432.
- [40] Hena S, Fatimah N, Tabassum S, et al. Magnetophoretic Harvesting of Freshwater Microalgae Using Polypyrrole/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposite and Its Reusability[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28(3): 1597-1609.
- [41] Zhang X, He X, Wei M, et al. Magnetic Flocculation Treatment of Coal Mine Water and a Comparison of Water Quality Prediction Algorithms[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38(2): 391-401.
- [42] Fathi A, Mohamed T, Claude G, et al. Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate[J]. Water Research, 2006, 40(10): 1941-1950.
- [43] Alimi F, Boubakri A, Tlili M M, et al. A comprehensive factorial design study of variables affecting CaCO<sub>3</sub> scaling under magnetic water treatment[J]. Water science and technology: A journal of the International Association on Water Pollution Research, 2014, 70(8): 1355-1362.
- [44] 胡家玮,李军,卞伟.城市废水磁混凝预处理及其表征分析[J].给水排水,2014(S1):221-225.
- [45] Gang T, Ping Y, Jibai W, et al. Factors Influencing Flocculation of Superconducting Magnetic Separation Process[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(7): 60-64.
- [46] Feng L, Zheng H, Tang X, et al. The investigation of the specific behavior of a cationic block structure and its excellent flocculation performance in high-turbidity water treatment[J]. RSC Advances, 2018, 8: 15119-15133.
- [47] Liu Y, Zheng H, Wang Y, et al. Synthesis of a cationic polyacrylamide by a photocatalytic surface-initiated method and evaluation of its flocculation and dewatering performance: nano-TiO<sub>2</sub> as a photo initiator[J]. RSC Advances, 2018, 8(50): 28329-28340.

(责任编辑:王丝语)

(上接第119页)

- [2] 陈健,赵克崴,连萍,等.黑龙江省2018年后春降水及干旱变化特征分析[J].黑龙江气象,2018,35(3):1-2,5.
- [3] 姜丽霞,陈可心,刘丹,等.2013年黑龙江省主汛期降水异常特征及其对作物产量影响的分析[J].气象,2015,41(1):105-112.
- [4] 姜丽霞,吕佳佳,曲辉辉,等.黑龙江省玉米生长期冷害与干旱混合发生对产量的影响[J].灾害学,2019,34(4):6-13.
- [5] 周瑾,祖世亨.“98”嫩江特大洪涝对大庆市粮食产量的影响[J].黑龙江气象,1999(4):34-37.
- [6] 马晓刚,李凝,周斌,等.干旱对阜新粮食产量的影响研究[J].灾害学,2019,34(1):139-144.
- [7] 李永和,石亚月,陈耀岳.试论洪涝对水稻的影响[J].自然灾害学报,2004,13(6):83-87.
- [8] 邱美娟,王冬妮,王美玉,等.近35年吉林省玉米气候适宜度及其变化[J].东北农业科学,2019,44(1):70-78.
- [9] 高迎娟,崔金平,王智宇,等.通化冰雹发生规律及防御上的几点思考[J].东北农业科学,2018,43(6):49-52.
- [10] 纪瑞鹏,于文颖,武晋雯,等.气候平均值变化对辽宁水稻延迟型冷害评估结果的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1695-1703.
- [11] 许晖,王丽伟,徐昕,等.近55年吉林省霜期的气候变化特征[J].东北农业科学,2020,45(2):83-86,90.
- [12] 邱美娟,王冬妮,王美玉,等.近几十年吉林省水稻品质气候资源变化状况[J].东北农业科学,2018,43(2):54-59.
- [13] 王萍,李秀芬,姜丽霞,等.气候变化背景下黑龙江省主栽作物稳产类型区划[J].东北农业科学,2019,44(4):85-88.
- [14] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮.东北地区近44年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J].生态学杂志,2005,24(7):751-755.
- [15] 姜丽霞,李帅,纪仰慧,等.1980-2005年松嫩平原土壤湿度对气候变化的响应[J].应用生态学报,2009,20(1):91-97.
- [16] 陈立亭,孙玉亭.黑龙江省气候与农业[M].北京:气象出版社,2000:1-98.
- [17] 姜丽霞,朱海霞,闫敏慧,等.黑龙江省主汛期异常降水变化及其与洪涝的关系研究[J].灾害学,2019,34(2):1-6.

(责任编辑:王丝语)