

李卫平,张明天,张列宇,等.生物磁效应在环境污染治理与修复中的应用[J].环境工程技术学报,2022,12(5):1420-1427.

LI W P,ZHANG M T,ZHANG L Y,et al.Application of biological magnetic effects in environment pollution control and restoration[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1420-1427.

生物磁效应在环境污染治理与修复中的应用

李卫平¹,张明天^{1,2},张列宇²,杜彩丽^{2,3},祝秋恒^{2,4},李晓光^{2*}

1.内蒙古科技大学能源与环境学院

2.环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

3.同济大学环境科学与工程学院

4.北京师范大学水科学研究院

摘要 磁场是一种具有特殊能量的场,是影响生物体生理过程的物理因素之一。所有生物体自身均具有磁场,外加磁场可对生物体组织和代谢过程产生影响。磁场通过对生物体内重要物质——生物酶的改变进而影响生物从生长到衰亡的全过程;磁场对微生物的影响较为复杂,会对微生物产生不同程度的促进或抑制作用;同时,施加磁场会对细胞结构、基因表达、细胞膜通透性等产生影响。近年来,磁场诱导生物磁效应在水体、土壤、固体废物等污染治理过程中的作用受到了普遍关注。系统梳理了外加磁场对生物酶活性、微生物特性及生物细胞等产生的生物磁效应影响,总结了生物磁效应在废水处理、土壤环境治理及固体废物处理等领域的研究现状,并提出了未来生物磁效应在环境领域的应用展望。

关键词 磁场;微生物;生物磁效应;环境治理;修复

中图分类号:X703 文章编号:1674-991X(2022)05-1420-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20220026

Application of biological magnetic effects in environment pollution control and restoration

LI Weiping¹, ZHANG Mingtian^{1,2}, ZHANG Lieyu², DU Caili^{2,3}, ZHU Qiuhe^{2,4}, LI Xiaoguang^{2*}

1.College of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology

2.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

3.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University

4.College of Water Science, Beijing Normal University

Abstract Magnetic field is a field with special energies which is one of the physical factors affecting the physiological processes of living organisms. All organisms have their own magnetic fields, and the external magnetic field can have an impact on organism organization and metabolic processes. The magnetic field affects the whole process of organisms from growth to decay through the change of biological enzymes, an important substances in the body of life. The influence of magnetic field on microbes are more complex, and the magnetic field will produce different degrees of promotion or inhibition effect on microbes. Meanwhile, the application of magnetic field may have effects on cell structure, gene expression, cell membrane permeability, etc. In recent years, the role of magnetic field-induced biological magnetic effect in the treatment of environmental pollution such as water, soil and solid waste has attracted general attention. The effects of applied magnetic field on biological enzyme activity, microbial properties and biological cells were systematically reviewed. Based on this, the current researches of microbial magnetic effect in wastewater, soil environment and solid waste treatment were systematically summarized, and the application prospects of magnetic field biological effect in the environmental field were put forward, in order to provide a theoretical basis for biological magnetic effect to strengthen environmental remediation.

Key words magnetic field; microbe; biological magnetic effects; environmental pollution control; restoration

收稿日期:2022-01-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0409202)

作者简介:李卫平(1973—),男,教授,博士,主要从事环境生态治理与修复研究, sjlwp@163.com

* 责任作者:李晓光(1982—),女,副研究员,博士,主要从事土壤污染治理与修复研究, lixiaoguang@craes.org.cn

磁场是一种具有特殊能量的场。20世纪初,法拉第观察到在外部磁场与内部分子磁性的相互作用下,分子性质、分子反应及分子环境发生了变化。所有生物体自身均具有磁场,外加磁场或者特殊磁场可以对生物体的组织和代谢产生影响^[1-3]。研究发现磁场会使含有过渡金属离子的蛋白质和酶具有顺磁性,导致酶活性增加^[4]。磁场能够改善细胞膜的通透性,增强营养物质的吸收和转运,从而促进物质的合成^[5]。磁场也可以通过跨膜信息传递、电子转移、基因表达以及酶活性等多种机制调控生物的生长和代谢^[6-7]。自由基机制是磁场影响生物化学系统相互作用的主要机制^[8]。该机制存在于ATP的酶合成、DNA的复制和蛋白质的酶磷酸化3个至关重要的细胞过程中。磁场改变自由基的自旋状态并引起自由基顺磁共振,进而导致生物体生长代谢发生改变^[9]。

近年来,磁场诱导微生物磁效应在水体、土壤、固体废物等环境污染治理过程中的作用得到了普遍关注。笔者系统分析了磁场对生物酶活性、微生物群落特征及生物细胞的影响,重点阐明了磁场微生物效应在水体、土壤及固体废物处理等环境领域的应用现状,并提出未来磁场微生物效应在环境领域的优化方向及应用展望,以期为微生物磁效应强化水体、土壤、固体废物等环境介质的修复提供理论依据。

1 磁场生物学效应

1.1 磁场对生物酶活性的影响

酶是生命体内重要的物质,参与生命系统中许多生化反应,如消化、光合作用、呼吸作用和新陈代谢等。外加磁场通过影响酶活性进而影响生物从生长到衰亡的全过程,包括生物的形态、生长以及代谢等过程^[10]。生物产生的很多酶或蛋白质中含有少量的锌、锰、铁、铜等过渡金属,这些金属具有顺磁性。施加磁场后金属沿磁场方向排列,同时对酶的三维结构、酶内自由电子跃迁产生影响,打破分子内部的稳态,从而影响酶活性。栗杰等^[11]研究发现,在杆菌、螺旋菌等细菌体内含有铁等金属离子,对磁场具有很高的敏感性。磁场对不同种类生物酶产生的磁效应有很大差异,如当磁场强度为100~500 mT时,细菌中酶活性会受到严重抑制,而放线菌、真菌等生长则受到激活^[12],磁场对白色念珠菌中酶活性具有促进作用,但会严重抑制葡萄糖菌的生长^[13]。磁场对不同生物种类的相同酶所产生的磁效应亦存在较大差别,如Amara等^[14]发现当磁场强度为250

mT时,巨噬细胞的谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)和超氧化物歧化酶(SOD)没有发生改变,而Kurzeja等^[15]发现,静磁场(400、600和700 mT)可以降低氟离子对小鼠成纤维细胞的氧化应激,并使GPx和SOD的活性正常化。可见,磁场通过对生物酶的改变进而影响生物的生命活动。

1.2 磁场对微生物生长代谢特征的影响

磁场对微生物的影响较为复杂,磁场会对微生物产生不同程度的刺激作用,但原理尚不明确。当磁场作用于微生物时,微生物体内会产生磁场效应,这种效应可能是正的,也可能是负效应,从而抑制微生物的生长^[16]。磁场对微生物最直接的影响是微生物的生长状态。Ren等^[17]研究发现,低强度磁场(15~25 mT)提高了细胞膜的通透性,增强了油脂降解菌的活性。Haghi等^[18]研究发现,与对照组相比,外加磁场(16 mT)增加了大肠杆菌的数量,并且死亡时期细菌衰死速度变缓。Mohtasham等^[19]通过控制培养液中pH(pH=7),添加10 mT的磁场后,发现杆菌肽浓度显著提高,最高达到89%。Wang等^[20]发现,当添加48.0 mT的磁场时,提高了亚硝酸盐氧化菌的活性,促进亚硝酸盐氧化菌的生长。但也有研究发现磁场会抑制部分微生物(如*Serratia marcescens*和*Escherichia coli*)的生长^[21-22]。Filipič等^[23]研究发现,17 mT的静磁场会对废水处理过程2种微生物(大肠杆菌和假单胞菌)的生长产生抑制,但却提高了体内脱氢酶活性和ATP浓度,可能的解释是微生物对磁场有应激反应。Xu等^[24]研究了不同强度的磁场有利于优势菌株的生长和繁殖,特别是对具有Cr(VI)还原能力的短杆菌和芽孢杆菌处理效果更好。Ji等^[22]发现,在静磁场作用下,大肠埃希菌的存活率随着作用时间的延长而减弱。由此可见,磁场性质、磁场强度及作用时间不同,磁场对不同种类微生物产生的影响亦不同^[2]。

1.3 磁场对生物细胞构型的影响

磁场的施加可能会对细胞结构、基因表达、细胞膜通透性等产生影响^[25-26]。Albuquerque等^[27]系统总结了磁场强度、细胞类型和暴露时间对细胞或细胞内结构的影响,发现静态磁场可能影响细胞的蜂窝系统,进而对生物分子的敏感性、细胞内结构修饰和酶反应变化产生影响。Ghodbane等^[26]研究发现,静磁场的添加引起活性氧(ROS)和顺磁自由基氧活性的增加,从而引起DNA断裂、凋亡和氧化应激。许燕滨^[28]发现,施加100 mT的外加磁场可引起细胞膜的磷脂双分子层结构重构,从而影响生物膜的通透性。Goto等^[29]报道了大鼠海马神经元的

Ntan1 基因在 100 mT 静态磁场下受到影响。Jouni 等^[30]观察到在自然辐射条件下, 预培养的 *Viciafaba* 细胞暴露在 15 mT 静态磁场中时, 染色体畸变(桥、片段和滞后染色体)和染色体数量显著增强。Zhang 等^[31]发现较高磁场强度静磁场(9 000 mT)可以显著增加 *soxR* 和 *sodAsodB* 突变体的突变概率。Chater 等^[32]研究发现, 在强磁场下生物大分子结构易受到磁场影响, 甚至造成 DNA 碱基发生突变。Shankayi 等^[33]发现, 磁场强度在 500~5 000 mT 时, 可引起癌细胞 DNA 碱基突变, 结构稳定性变低。然而, 也有研究显示, 不同磁场强度与基因表达、DNA 分子结构破坏之间无明显相关性。如 Jouni 等^[30-31]研究发现, 磁场强度(15~3 700 mT)、持续暴露时间等与基因表达和 DNA 分子结构破坏之间无明显相关性。可见, 对磁场影响生物大分子结构的机理还需开展进一步研究。

2 生物磁效应在环境治理中的应用

2.1 在废水处理中的应用

2.1.1 对重金属去除的影响

外加磁场能够影响废水处理中重金属的去除效果, 一方面, 磁场可以增大微生物对重金属的吸附容量, 进而提高重金属去除率。例如, 靳小蓓^[34]采用磁场与微生物固定技术处理酸性镀铜废水, 发现在引入磁场后微生物对重金属的吸附效能显著提高, 在气水比为 0.5、水力停留时间为 5 h、初始浓度为 50 mg/L、载体中心磁场强度为 14 mT 时, 铜去除率最高达到 89.98%。另一方面, 磁场可以促进优势菌株的生长和繁殖, 强化对重金属的去除能力。Xu 等^[24]研究发现, 不同强度(2.4、6、10、17.4 mT)的静磁场均能够促进 Cr(VI)污染废水中短杆菌属和芽孢杆菌属的生长, 与对照组相比微生物数量提高 32%~65%, 且对 Cr(VI)具有还原能力, 当暴露在 6 mT 磁场时, Cr(VI)去除率最高, 达到 36.17%。此外, 一些微生物由于磁场效应引起的细胞增殖速率和微生物酶活性增加^[35], 能够提高对废水中重金属的表面吸附和跨膜运输^[34]。如 Xu 等^[36]研究发现, 引入磁场可提高蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)的吸附性能, 当磁场强度为 17.4 mT 时, 菌体胞外聚合物(EPS)表面负电荷增加 20%, 对 Cr³⁺的静电吸附能力增强。在废水处理中, 磁场可以通过强化微生物对重金属的吸附效果来提高废水中重金属的去除效率^[37]。

2.1.2 对有机污染物去除的影响

通过外加磁场可以影响微生物的生长和代谢活性, 进而提高有机污染物的生物降解效率。研究表

明, 适宜强度的外加磁场对活性污泥生物量增长和脱氢酶活性具有正向影响, 进而提高了废水中甲醛和 COD 的去除效率^[38-39]。Yavuz 等^[40]研究发现, 在 8.9~46.6 mT 磁场强度范围内, 活性污泥底物(如葡萄糖)去除率和微生物活性先随磁场强度提高而增大, 并在 17.8 mT 时达到最大值, 之后随着磁场强度的增加而降低。许燕滨等^[41]发现, 引入磁场有助于推动厌氧优势菌生物系统的硝化过程, 抑制硫酸盐还原菌生长, 从而控制系统中 H₂S、NH₃ 等臭气的产生, 同时提高 COD_{Cr} 的消耗速率。耿淑英等^[42]发现, 外加磁场在一定程度上提高了序批式活性污泥系统(SBR)中污染物的去除性能, 当磁场强度为 70 mT 时, SBR 系统对 TN 去除效果最好, 脱氮率提高到 85.98%^[42]。封志飞等^[43]发现, 磁场耦合电化学生物膜反应器(BER)对 TN 的去除率提高了 10%~30%, 并能促进 BER 反硝化。Hu 等^[44]发现, 适当强度的静磁场(20 mT)能显著提高缺氧反硝化菌的丰度和好氧反硝化菌的活性, 而高磁场强度(40 mT)会对微生物新陈代谢产生负面影响, 选择合适的场强是磁场强化生物处理废水的关键。Lebkowska 等^[45]在研究静磁场对活性污泥生物降解合成废水及活性污泥微生物脱氢酶活性的影响时发现, 与对照组(0 mT)相比, 磁场强度为 75 mT 时活性污泥中微生物的脱氢酶活性提高了 35%, 对硝基苯胺的去除率提高 30%, 同时有助于微生物大肠杆菌重组。Wang 等^[46]研究发现, 48.0 mT 的磁场提高了亚硝酸盐氧化菌活性并促进其生长, 使亚硝酸盐氧化速率从 3.7 mg/(g·h) 提高到 149 mg/(g·h)。隋卫燕等^[47]研究发现, 不同的磁场强度下活性污泥具有不同的去污能力, 高强度磁场(150 mT)能迅速提高活性污泥对有机物的去除能力, 而中强度磁场(80 mT)能够同时提高对有机物和磷酸盐的去除率。Liu 等^[48]研究发现, 磁场可使微生物分泌更多的 EPS, 低强度磁场(3~5 mT)作用下的颗粒污泥中 EPS 增加了 77%, 在不利环境条件下 EPS 可作为微生物的碳源和能源^[49], 即使在间歇循环运行(包括饥饿期)中, COD 降解速率也有显著提高。由此可见, 外加磁场通过提高微生物酶活性, 增强有机物降解菌活性, 并产生较为富足的能量(如 EPS), 为高效去除有机物提供保障。

2.1.3 对微藻生长及污水净化的影响

微藻是应用生物技术领域的一种重要微生物, 可用于污水中 BOD₅、氮、磷、重金属及有机物的去除, 抑制大肠杆菌生长等^[50]。微藻在生长过程中能够利用太阳能进行光合作用, 其产生的 O₂ 被废水中

生长的细菌用来降解有机物,有机物分解产生的CO₂和废水中丰富的氮、磷等营养物质可以作为微藻生长的原料,进而合成生物质所需的细胞材料。已有研究发现,在微藻培育过程中磁场引入可促进小球藻生长,提高脂质含量^[51-53],同时微藻的产氧能力也有明显提高^[54]。Deamici等^[55]研究发现,60 mT磁场能提高螺旋藻的生物量,同时增加蛋白质、碳水化合物含量;Tu等^[54]发现,静磁场对细菌-藻类共生系统中藻类的生长和产氧有促进作用,适当的磁场强度(100 mT)可以降低曝气对城市污水中有机物降解所需要的能量消耗。Swaminathan等^[56]研究发现,脉冲磁场在提高染料工业废水中微藻产量的同时,显著降低了废水中BOD₅、COD以及硝酸盐等污染物浓度。Shao等^[57]研究表明,磁场不仅提高了螺旋藻产量,同时提高了微藻去除重金属离子Cd²⁺的效率。席婷婷^[58]研究发现,276号斜生栅藻在100 mT磁场下处理0.5 h可提高产氧量15%以上,在200~500 mT强磁场下其生长则会受到抑制,而9号蛋白核小球藻在不同磁场强度作用下生物量和产氧量都有所提高。

磁场不仅可以用于提高微藻活性,也可与其他废水处理工艺相结合。如通过在厌氧氨氧化工艺进水口施加磁场,可使其脱氮率提高30%,且工艺的启动时间缩短约1/4^[59]。Wang等^[20]通过外加静磁场(48 mT)来加速活性污泥转化为好氧颗粒,结果表明外加磁场使活性污泥积累了铁化合物,改善了颗粒的沉降性,刺激了EPS的分泌,将制粒时间从41 d减至25 d,同时磁场促进了亚硝酸盐氧化细菌的生长和活性。综上所述,磁场处理具有处理效率高、无二次污染、能耗低等优点,将磁场用于废水处理时对增强微生物活性,缩短启动时间,提高生物降解和污染物去除性能等具有良好效果。

2.2 在土壤环境治理的应用

2.2.1 对土壤微生物的影响

外加磁场能够影响土壤理化性质、土壤微生物数量及微生物群落结构。适宜的磁场能够降低土壤ζ电位、比表面积及土壤膨胀量等物理性状,增强土壤微团聚作用,从而改善土壤肥力水平^[60]。土壤微团聚体的增加可显著提高土壤微生物数量及其酶活性^[61],优良的土壤营养水平有利于土壤微生物的繁殖^[62]。土壤微生物可分泌具有催化活性的物质——土壤酶^[63],其活性受微生物数量和种类影响较大^[64]。依艳丽等^[65]发现,500 mT磁场处理棕壤10 min可有效抑制脲酶活性,抑制时间长达42 d。李晓忱等^[66]研究发现,磁场强度为300 mT时处理根瘤

菌10 min,其过氧化氢酶(CAT)活性增幅最大;100 mT时处理根瘤菌10 min,其SOD活性增幅最大。张传进等^[67]研究不同磁处理方式对豌豆根际土壤生物学性状的影响,发现200 mT磁场加5 g磁化铁粉可显著提高豌豆根际土壤中的微生物数量、细菌多样性和酶活性。微生物可吸附土壤中的重金属并将其转化为低毒形态,从而降低重金属污染程度^[68]。如Qu等^[6]在研究重组微生物对土壤进行生物修复时得出,弱磁场可以促进污染土壤中Cr(VI)的解吸和G1株(*Geotrichum* sp.)的生长,但对B2株(*Bacillus* sp.)有抑制作用。目前,磁处理技术在土壤修复中的应用报道较少,利用磁场诱导微生物重组进行生物修复的研究还有待深入探索。

2.2.2 对植物修复重金属污染土壤的影响

植物修复被认为是一种应用前景广、潜力大的土壤重金属修复技术^[69],主要通过植物体的吸附、吸收、分解、转化、挥发以及根际过滤等作用来容纳、固定、转移或转化土壤中的重金属,最终通过收割植物实现土壤中重金属不同程度的去除。研究表明,外加磁场可通过光合作用刺激植物生长和发育,改变植物系统在细胞膜水平上的静电平衡^[70]和植物器官的生化平衡^[71],有效促进重金属从地下部向地上部的转移,提高植物对重金属的吸附能力。Jin等^[72]用不同强度和方向的静磁场处理拟南芥幼苗,发现静磁场能刺激细胞数量的增加,显著促使植物根系的生长。Bulak等^[73]运用强度为60与120 mT交变电磁场(50 Hz)对白芥子种子进行1 min预处理后,白芥子种子芽中的Cd含量分别高于对照组73%和78%,电磁场预处理显著增加了Cd在地上部的积累。Luo等^[74]通过添加磁场提高了高羊茅对Cd的修复效率,植物枯死叶吸收Cd含量增加23.6%。Luo等^[75]发现磁场也可以提高天蓝遏蓝菜对Cd、Zn的富集,强化蒸腾速率,产生较强水势梯度驱动重金属离子向上运输,从而抑制了Pb、Cu的淋溶。Luo等^[76]的研究还发现,植物蓝桉播种前经静磁场处理后植物中的金属浓度显著升高,并且在修复过程中可以有效截留降雨模拟试验产生的渗滤液。磁场可以改变植物细胞中某些抗氧化酶活性,如CAT、SOD、过氧化物酶(POD)等。如Bhardwaj等^[77]研究发现,黄瓜种子暴露于静磁场时,SOD活性提高8%,CAT活性提高83%。重金属进入植物体内会在细胞膜上诱导积累大量自由基导致脂质过氧化,造成植物酶活性改变^[78],经磁场处理可以克服有害的环境因素。Çelik等^[79]研究发现,经磁场处理后植物防御系统中的SOD和CAT活性功能增强。

Chen 等^[80]发现,与单纯 Cd 胁迫相比,经 600 mT 磁场加 Cd 处理的幼苗中丙二醛(MDA)、 H_2O_2 、 $O_2^{\cdot-}$ 浓度降低,光合作用提高,说明磁场对 Cd 胁迫的毒理效应有一定的补偿作用。综上所述,外加磁场会促进种子萌发,缩短植物生长周期,提高植物生物量和酶活性等生理指标,可有效改善植物对污染土壤的修复效果,缓解重金属对土壤的毒害^[81-83]。因此磁场联合植物对土壤进行修复未来可能是一种新型的生物修复技术。

2.3 在固体废物处理中的应用

2.3.1 在垃圾渗滤液处理中的应用

随着城市化和工业化进程加快,固体废物产生量逐年增加,全球 161 个国家 2025 年固体废物产生量预计增至 22 亿 t^[84]。垃圾填埋场是处理固体废物的重要场所,但如果垃圾渗滤液处理不当将对土壤、地下水及人体健康造成严重危害。磁处理技术作为一种物理处理技术,对垃圾渗滤液中的悬浮固体以及有机污染物的去除具有较大潜力。Othman 等^[85]利用磁场强度为 550 mT 的循环流动系统处理垃圾渗滤液,结果表明 SS、COD 和 BOD_5 的去除率均在 60% 以上。Sa'at 等^[86]采用 550 mT 的磁场对垃圾渗滤液进行循环预处理,发现磁场预处理后的垃圾渗滤液处理效果显著提高,其中 NH_3-N 、SS、 PO_4^{3-} 去除率分别为 98.7%、90.2% 和 94.5%。罗亚田等^[87]发现与单一-交变脉冲电絮凝处理相比,磁场协同作用显著提高垃圾渗滤液的处理效果,老龄垃圾渗滤液的 COD_{Cr} 与 NH_3-N 的去除率分别提高了 16.01% 和 7.82%。但值得注意的是,不同的磁场强度对于渗滤液中污染物的去除效率有较大影响。如 Al-Wasify 等^[88]研究了 3 种低强度磁场(0.12、0.24 和 0.36 mT)在不同接触时间下对垃圾渗滤液中污染物及细菌去除的影响,结果表明当磁场强度为 0.36 mT 时,对垃圾渗滤液中各污染物去除效果最好, BOD 、 COD 、SS、 NH_3-N 、细菌总数和总大肠菌群分别降低了 38.2%、30.5%、16.0%、32.7%、45.2%和 41.2%,说明细菌总数和总大肠菌群的生长受到抑制,这可能是由于磁场对细菌 DNA 的损伤和抑制使其难以复制所致。由此,在垃圾渗滤液处理中,施加磁场可提高胶体颗粒的碰撞频率,加速颗粒凝聚并沉降,抑制病原菌等菌群的生长繁殖,提高污染物去除效率。

2.3.2 在固体有机废物厌氧发酵中的应用

随着畜禽养殖业的迅速发展,我国畜禽粪便产生量急速增加,预计到 2030 年将达到 37.4 亿 t^[89],未经处理的畜禽粪便对环境造成严重威胁。厌氧消化是将有机废物转换为沼气的技术,可用于实现畜禽

粪便的资源化和无害化。外加磁场在有效促进厌氧发酵效率和提高能量回收率方面具有良好效果,如 Huang 等^[90]通过在猪粪厌氧消化池中添加零价铁和磁场,发现由于磁场促进零价铁的腐蚀,强化互养细菌之间的直接电子传递过程,因而导致甲烷产量与对照组相比提高了 124.5%。Jia 等^[91]研究发现,添加磁场和具有核壳结构的钛球添加剂可以显著地提高厌氧发酵系统的性能,在最佳磁场强度(5 mT)作用下,相比于对照组,单厌氧发酵系统及牛粪、芦苇秸秆共厌氧发酵系统中甲烷产量分别提高了 27.12%~65.53% 和 8.47%~35.89%。Zieliński 等^[92]研究了磁化器诱导静磁场对厌氧消化产甲烷量及细菌、古生菌群落结构的影响,发现磁场(20 mT)处理显著增加了甲烷产量,相比于对照组,甲烷产气量由 200.2 mL/g(以挥发性固体计)提高到 373.2 mL/g,甲烷浓度由 49.1% 提高到 56.8%。同时,添加静磁场的反应器中乳酸菌的相对丰度提高 10%,促进了产甲烷菌的生成。目前,关于磁场强化固体有机废物厌氧产沼作用机理尚不明晰,需进一步开展深入研究。

3 展望

尽管磁场在环境污染治理和修复领域的实际应用可能仍有一些限制,如磁场强度,不同强度的磁场对生物体造成的影响不同,寻求最佳的磁场强度是保障系统运行的关键。但总体来说,基于磁场诱导的微生物磁效应在废水、土壤以及固体废物等环境领域的应用取得了一定的进展,具有较大的发展潜力。今后发展方向可能包括以下几个方面:1)磁场强化废水中污染物去除及降解的机理尚未完全明确,仍需要进一步开展深入研究。此外,磁场能够提高微生物活性的内在机理尚不明晰,量子力学能够在更深层次上揭示生命的奥秘,未来可以借助量子力学来探索磁场影响微生物活性的内部作用机制。2)在土壤修复中可以利用磁场对微生物的定向调控作用,开发植物-磁场-微生物耦合修复技术,提高超富集植物对土壤中目标污染物的吸收能力,以取得更好的土壤污染植物修复效果。3)磁场影响生物大分子结构的机理还需进一步研究。基于磁场对微生物群落结构的影响,定向培养有机物高效降解菌剂,缩短堆肥处理周期,提高对固体废物的利用率和无害化效果等。

参考文献

- [1] 焦富强. 基于微生物磁效应构建磁力强化生物滤池及其应用研究[D]. 济南: 济南大学, 2016.

- [2] 李国栋.2003—2004年生物磁学研究应用的新进展[J]. *生物磁学*, 2004, 4(4): 25-27.
LI G D. New progresses of research and application of biomagnetism in 2003-2004[J]. *Biomagnetism*, 2004, 4(4): 25-27.
- [3] MOORE R L. Biological effects of magnetic fields: studies with microorganisms[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1979, 25(10): 1145-1151.
- [4] WANG Y L, GU X, QUAN J N, et al. Application of magnetic fields to wastewater treatment and its mechanisms: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145476.
- [5] SANTOS L O, DEAMICI K M, MENESTRINO B C, et al. Magnetic treatment of microalgae for enhanced product formation[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2017, 33(9): 169.
- [6] QU M M, CHEN J M, HUANG Q Q, et al. Bioremediation of hexavalent chromium contaminated soil by a bioleaching system with weak magnetic fields[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, 128: 41-47.
- [7] 邓光武, 高梦祥.微生物磁效应的研究进展[J]. *长江大学学报(自然科学版)农学卷*, 2010, 7(3): 58-62.
- [8] WOODWARD J R. Radical pairs in solution[J]. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 2002, 27(3): 165-207.
- [9] REPACHOLI M H, GREENEBAUM B. Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: health effects and research needs[J]. *Bioelectromagnetics*, 1999, 20(3): 133-160.
- [10] TSUCHIYA K, OKUNO K, ANO T, et al. High magnetic field enhances stationary phase-specific transcription activity of *Escherichia coli*[J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 1999, 48(2): 383-387.
- [11] 栗杰, 依艳丽, 张大庚, 等.磁场对土壤呼吸强度的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35(6): 812-814.
LI J, YI Y L, ZHANG D G, et al. Effect of magnetic field on respiratory intensity of soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(6): 812-814.
- [12] 栗杰, 依艳丽, 焦颖, 等.棕壤微生物和几种酶活性的磁致效应研究[J]. *土壤通报*, 2007, 38(5): 957-961.
LI J, YI Y L, JIAO Y, et al. Effect of magnetic field on soil microbes and soil enzyme activities in brown earth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(5): 957-961.
- [13] 农光鲜, 张帮献, 黄翠波.磁场对白色念珠菌葡萄球菌及大肠杆菌的影响[J]. *中华理疗杂志*, 2001(1): 39.
- [14] AMARA S, DOUKI T, RAVANAT J L, et al. Influence of a static magnetic field (250 mT) on the antioxidant response and DNA integrity in THP₁ cells[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, 52(4): 889-898.
- [15] KURZEJA E, SYNOWIEC-WOJTAROWICZ A, STEC M, et al. Effect of a static magnetic fields and fluoride ions on the antioxidant defense system of mice fibroblasts[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14(7): 15017-15028.
- [16] BERETTA G, MASTORGIO A F, PEDRALI L, et al. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, 18(1): 29-75.
- [17] REN Z J, LENG X D, ZHANG Z X, et al. Effect of low-strength magnetic fields on the oil removal performance of oil-degrading microorganisms[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 120: 133-140.
- [18] HAGHI M, MAGHSOODI M J, JANIPOR M B, et al. Effect of static magnetic field on *E. coli* growth[J]. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*, 2012, 3(4): 777-781.
- [19] MOHTASHAM P, KESHAVARZ-MOORE E, KALE I, et al. Application of magnetic field for improvement of microbial productivity[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2016, 49: 43-48.
- [20] WANG X H, DIAO M H, YANG Y, et al. Enhanced aerobic nitrifying granulation by static magnetic field[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 105-110.
- [21] PIATTI E, CRISTINA ALBERTINI M, BAFFONE W, et al. Antibacterial effect of a magnetic field on *Serratia marcescens* and related virulence to *Hordeum vulgare* and *Rubus fruticosus* callus cells[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2002, 132(2): 359-365.
- [22] JI W J, HUANG H M, DENG A H, et al. Effects of static magnetic fields on *Escherichia coli*[J]. *Micron*, 2009, 40(8): 894-898.
- [23] FILIPIĆ J, KRAIGHER B, TEPUŠ B, et al. Effects of low-density static magnetic fields on the growth and activities of wastewater bacteria *Escherichia coli* and *Pseudomonas putida*[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 120: 225-232.
- [24] XU Y B, SUN S Y. Effect of stable weak magnetic field on Cr(VI) bio-removal in anaerobic SBR system[J]. *Biodegradation*, 2008, 19(3): 455-462.
- [25] 朱杰.磁场的生物学效应及其机理的研究[J]. *生物磁学*, 2005, 5(1): 26-29.
ZHU J. Study on the biological effects of magnetic fields and its possible mechanisms[J]. *Biomagnetism*, 2005, 5(1): 26-29.
- [26] GHODBANE S, LAHBIB A, SAKLY M, et al. Bioeffects of static magnetic fields: oxidative stress, genotoxic effects, and cancer studies[J]. *BioMed Research International*, 2013, 2013: 602987.
- [27] ALBUQUERQUE W W C, COSTA R M P B, de SALAZAR e FERNANDES T, et al. Evidences of the static magnetic field influence on cellular systems[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2016, 121(1): 16-28.
- [28] 许燕宾.利用磁生物效应净化含Cr(VI)废水的效果及机理研究[D].广州:广东工业大学, 2008.
- [29] GOTO Y, TANIURA H, YAMADA K, et al. The magnetism responsive gene Ntan1 in mouse brain[J]. *Neurochemistry International*, 2006, 49(4): 334-341.
- [30] JOUNI J F, ABDOLMALEKI P, GHANATI F. Study the effect of static magnetic field on chromosomal aberrations on *Vicia faba* in area with high natural radioactivity[J]. *The Environmentalist*, 2011, 31(2): 169-175.
- [31] ZHANG Q M, TOKIWA M, DOI T, et al. Strong static magnetic field and the induction of mutations through elevated production of reactive oxygen species in *Escherichia coli* soxR[J]. *International Journal of Radiation Biology*, 2003, 79(4): 281-286.
- [32] CHATER S, DOUKI T, FAVIER A, et al. Influence of static magnetic field on cadmium toxicity: study of oxidative stress and DNA damage in pregnant rat tissues[J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2008, 27(4): 393-401.
- [33] SHANKAYI Z, FIROOZABADI S M P, MANSOURIAN M, et al. The effects of pulsed magnetic field exposure on the permeability of leukemia cancer cells[J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2014, 33(2): 154-158.
- [34] 靳小蓓.磁场与微生物固定技术处理酸性镀铜废水[D].长春:东北师范大学, 2015.
- [35] 程洋洋.磁性厌氧生物滤床处理酸性多金属有机物复合冶炼废水的特性分析[D].湘潭:湘潭大学, 2014.
- [36] XU Y B, HOU M Y, RUAN J J, et al. Effect of magnetic field on

- surface properties of *Bacillus cereus* CrA and its Extracellular Polymeric Substances (EPS)[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28(21): 2196-2208.
- [37] SUN Y K, GUAN X H, WANG J M, et al. Effect of weak magnetic field on arsenate and arsenite removal from water by zerovalent iron: an XAFS investigation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(12): 6850-6858.
- [38] LEBKOWSKA M, NAROŹNIAK-RUTKOWSKA A, PAJOR E. Effect of a static magnetic field of 7 mT on formaldehyde biodegradation in industrial wastewater from urea-formaldehyde resin production by activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 132: 78-83.
- [39] LEBKOWSKA M, RUTKOWSKA-NAROŹNIAK A, PAJOR E, et al. Effect of a static magnetic field on formaldehyde biodegradation in wastewater by activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19): 8777-8782.
- [40] YAVUZ H, ÇELEBI S S. Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2000, 26(1): 22-27.
- [41] 许燕滨, 陈惠斌, 李郁, 等. 磁场对厌氧除Cr(VI)工艺产气组成的影响及其机理分析[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(12): 1482-1488.
- XU Y B, CHEN H B, LI Y, et al. Mechanism and effect of magnetic field on biogas composition from anaerobic Cr(VI) removal process[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(12): 1482-1488.
- [42] 耿淑英, 付伟章, 王静, 等. SBR系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4715-4724.
- GENG S Y, FU W Z, WANG J, et al. Treatment efficiency and microbial community diversity in a magnetic field enhanced sequencing batch reactor (SBR)[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(11): 4715-4724.
- [43] 封志飞, 赵国智, 李文红, 等. 电化学生物膜反硝化磁场促进效应[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(1): 63-69.
- FENG Z F, ZHAO G Z, LI W H, et al. Magnetic field enhancement of nitrogen removal by bioelectrochemical process[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(1): 63-69.
- [44] HU B, GU X, WANG Y L, et al. Revealing the effects of static magnetic field on the anoxic/oxic sequencing batch reactor from the perspective of electron transport and microbial community shifts[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345: 126535.
- [45] LEBKOWSKA M, RUTKOWSKA-NAROŹNIAK A, PAJOR E, et al. Impact of a static magnetic field on biodegradation of wastewater compounds and bacteria recombination[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(23): 22571-22583.
- [46] WANG Z B, LIU X L, NI S Q, et al. Weak magnetic field: a powerful strategy to enhance partial nitrification[J]. *Water Research*, 2017, 120: 190-198.
- [47] 隋卫燕, 宋鹏, 韩甜甜, 等. 磁场强化活性污泥法处理城镇污水研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(33): 20469-20471.
- SUI W Y, SONG P, HAN T T, et al. Contrastive studies on experiment of activated sludge method enhanced by magnetic field for treating urban wastewater[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(33): 20469-20471.
- [48] LIU Y Q, SUHARTINI S, GUO L, et al. Improved biological wastewater treatment and sludge characteristics by applying magnetic field to aerobic granules[J]. *AIMS Bioengineering*, 2016, 3(4): 412-424.
- [49] SALAMA Y, CHENNAOUI M, SYLLA A, et al. Characterization, structure, and function of extracellular polymeric substances (EPS) of microbial biofilm in biological wastewater treatment systems: a review[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(35): 16220-16237.
- [50] BOELEEE N C, TEMMINK H, JANSSEN M, et al. Scenario analysis of nutrient removal from municipal wastewater by microalgal biofilms[J]. *Water*, 2012, 4(2): 460-473.
- [51] SIVASUBRAMANIAN V, SUBRAMANIAN V, PRIYA L, et al. Application of Pulsed Magnetic Field in improving the quality of algal biomass[J]. *Algal Biomass Utiln*, 2010, 1(4): 1-9.
- [52] WANG H Y, ZENG X B, GUO S Y, et al. Effects of magnetic field on the antioxidant defense system of recirculation-cultured *Chlorella vulgaris*[J]. *Bioelectromagnetics*, 2008, 29(1): 39-46.
- [53] HAN S F, JIN W B, CHEN Y G, et al. Enhancement of lipid production of *Chlorella pyrenoidosa* cultivated in municipal wastewater by magnetic treatment[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2016, 180(6): 1043-1055.
- [54] TU R J, JIN W B, XI T T, et al. Effect of static magnetic field on the oxygen production of *Scenedesmus obliquus* cultivated in municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2015, 86: 132-138.
- [55] DEAMICI K M, COSTA J A V, SANTOS L O. Magnetic fields as triggers of microalga growth: evaluation of its effect on *Spirulina* sp[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 62-67.
- [56] SWAMINATHAN D. Studies on the effect of pulsed magnetic field on the productivity of algae grown in dye industry effluent[J]. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 2017, 3(5): 1-5.
- [57] SHAO W L, EBAID R, ABOMOHR A E F, et al. Enhancement of *Spirulina* biomass production and cadmium biosorption using combined static magnetic field[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 163-169.
- [58] 席婷婷. 城市污水培养藻类系统中影响藻类供氧效能的因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [59] LIU S T, YANG F L, MENG F G, et al. Enhanced anammox consortium activity for nitrogen removal: impacts of static magnetic field[J]. *Journal of Biotechnology*, 2008, 138(3/4): 96-102.
- [60] 依艳丽, 刘孝义. 磁场对土壤理化和机械物理性状影响的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1994(1): 84-89.
- YI Y L, LIU X Y. Effect of magnetic treatment on the soil physical and chemical properties and mechanical physical properties[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 1994(1): 84-89.
- [61] 唐海龙, 龚伟, 王景燕, 等. 青花椒种植对土壤微团聚体分形维数和生化特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1): 90-97.
- TANG H L, GONG W, WANG J Y, et al. Effect of planting *Zanthoxylum armatum* on fractal dimension and biochemical characteristics of soil micro-aggregates[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(1): 90-97.
- [62] 叶斌, 黄兰英, 李春华, 等. 太湖竺山湾缓冲带草林系统生长状态及土壤性质分析[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(5): 411-417.
- YE B, HUANG L Y, LI C H, et al. Investigation on growth situation and soil property of grass-forest system in lake buffer zone of Zhushan Bay, Lake Taihu[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, 5(5): 411-417.
- [63] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 161-172.
- CHEN F J, XIA H J, LIU F D, et al. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. *Journal of*

- Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 161-172.
- [64] 王艳宇,刘爽,李鑫,等.3株耐盐碱促生菌对绿豆根际微生态的影响[J].*干旱地区农业研究*,2022,40(1):139-145.
WANG Y Y, LIU S, LI X, et al. Effects of three saline-alkali tolerant growth-promoting bacteria on the rhizosphere microecology of mung bean[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 139-145.
- [65] 依艳丽,栗杰,张大庚,等.磁场对棕壤脲酶活性的影响[J].*土壤通报*,2005,36(4):588-590.
YI Y L, LI J, ZHANG D G, et al. Effects of magnetic field on urease activity in brown soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 588-590.
- [66] 李晓忱,依艳丽.根瘤菌过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性的磁致效应研究[J].*土壤通报*,2014,45(5):1094-1098.
LI X C, YI Y L. Effects of magnetic treatment on catalase and superoxide dismutase activities of *Rhizobium*[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5): 1094-1098.
- [67] 张传进,任奎喻,郭霜,等.磁处理改善豌豆根际土壤生物学性状[J].*热带作物学报*,2020,41(4):829-836.
ZHANG C J, REN K Y, GUO S, et al. Soil biological properties in rhizosphere of pea(*Pisum sativum* L.) improved by magnetic treatments[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(4): 829-836.
- [68] FARHADIAN M, VACHELARD C, DUCHEZ D, et al. *In situ* bioremediation of monoaromatic pollutants in groundwater: a review[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(13): 5296-5308.
- [69] BAUDDH K, SINGH R P. Growth, tolerance efficiency and phytoremediation potential of *Ricinus communis* (L.) and *Brassica juncea* (L.) in salinity and drought affected cadmium contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 85: 13-22.
- [70] RADHAKRISHNAN R. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances tolerance against environmental stresses[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2019, 25(5): 1107-1119.
- [71] REINA F G, PASCUAL L A, FUNDORA I A. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds: part II. experimental results[J]. *Bioelectromagnetics*, 2001, 22(8): 596-602.
- [72] JIN Y, GUO W, HU X P, et al. Static magnetic field regulates *Arabidopsis* root growth via auxin signaling[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 14384.
- [73] BULAK P, LATA L, PLAK A, et al. Electromagnetic field pretreatment of *Sinapis alba* seeds improved cadmium phytoextraction[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(4): 338-342.
- [74] LUO J, HE W X, QI S H, et al. A novel phytoremediation method assisted by magnetized water to decontaminate soil Cd based on harvesting senescent and dead leaves of *Festuca arundinacea*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 383: 121115.
- [75] LUO J, HE W X, YANG D, et al. Magnetic field enhance decontamination efficiency of *Noccaea caerulea* and reduce leaching of non-hyperaccumulated metals[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 141-148.
- [76] LUO J, HE W X, XING X L, et al. The phytoremediation efficiency of *Eucalyptus globulus* treated by static magnetic fields before sowing[J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 891-897.
- [77] BHARDWAJ J, ANAND A, NAGARAJAN S. Biochemical and biophysical changes associated with magnetopriming in germinating cucumber seeds[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2012, 57: 67-73.
- [78] GALLEGO S M, BENAVIDES M P, TOMARO M L. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: evidence for involvement of oxidative stress[J]. *Plant Science*, 1996, 121(2): 151-159.
- [79] ÇELİK Ö, BÜYÜKUSLU N, ATAK Ç, et al. Effects of magnetic field on activity of superoxide dismutase and catalase in *Glycine max* (L.) merr. roots[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2009, 18: 175-182.
- [80] CHEN Y P, LI R, HE J M. Magnetic field can alleviate toxicological effect induced by cadmium in mungbean seedlings[J]. *Ecotoxicology*, 2011, 20(4): 760-769.
- [81] MANZANO A I, LARKIN O J, DIJKSTRA C E, et al. Meristematic cell proliferation and ribosome biogenesis are decoupled in diamagnetically levitated *Arabidopsis* seedlings[J]. *BMC Plant Biology*, 2013, 13: 124.
- [82] SHASHURIN M M, PROKOPIEV I A, FILIPPOVA G V, et al. Effect of extremely low frequency magnetic fields on the seedlings of wild plants growing in Central Yakutia[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2017, 64(3): 438-444.
- [83] VASHISTH A, JOSHI D K. Growth characteristics of maize seeds exposed to magnetic field[J]. *Bioelectromagnetics*, 2017, 38(2): 151-157.
- [84] ROSS D E, ROGOFF M J. 'What a waste...' the World Bank's call for action[J]. *Waste Management & Research*, 2012, 30(8): 755-757.
- [85] OTHMAN F, SOHAILI J, FAUZIA Z, et al. Influence of magnetic treatment on the improvement of landfill leachate treatment[J]. *International Journal of Environment and Waste Management*, 2009, 4(3/4): 433.
- [86] SA'AT M, KAMARIAH S. Subsurface flow and free water surface flow constructed wetland with magnetic field for leachate treatment[R]. Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia, 2006.
- [87] 罗亚田,余以雄,张伟方.磁场协同交变脉冲电化学场处理垃圾渗滤液[J].*环境科学研究*,2006,19(5):74-77.
LUO Y T, YU Y X, ZHANG W F. The cooperation of magnetic field and periodic electrochemistry field to degrade landfill leachate[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(5): 74-77.
- [88] AL-WASIFY R S, ALI M N, HAMED S R. Application of different magnetic intensities for the treatment of landfill leachate in Egypt[J]. *Cogent Engineering*, 2018, 5(1): 1436114.
- [89] 朱宁,马骥.中国畜禽粪便产生量的变动特征及未来发展展望[J].*农业展望*,2014,10(1):46-48.
ZHU N, MA J. Changes and outlook about production amount of livestock and poultry manure in China[J]. *Agricultural Outlook*, 2014, 10(1): 46-48.
- [90] HUANG W W, YANG F, HUANG W L, et al. Weak magnetic field significantly enhances methane production from a digester supplemented with zero valent iron[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 282: 202-210.
- [91] JIA B, YUN S N, SHI J, et al. Enhanced anaerobic mono- and co-digestion under mesophilic condition: focusing on the magnetic field and Ti-sphere core-shell structured additives[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 310: 123450.
- [92] ZIELIŃSKI M, ZIELIŃSKA M, CYDZIK-KWIATKOWSKA A, et al. Effect of static magnetic field on microbial community during anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 323: 124600. ⊗