

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.019

# 磁化诱导技术在水生态修复中的应用与研究展望

张列宇<sup>1</sup>, 祝秋恒<sup>1,2</sup>, 李晓光<sup>1</sup>, 李国文<sup>1</sup>, 唐文忠<sup>3</sup>, 赵琛<sup>4</sup>

(1. 中国环境科学研究院地下水模拟与控制重点实验室, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 4. 中国环境科学研究院流域水环境污染综合治理研究中心, 北京 100012)

**摘要:**介绍了磁化诱导技术及其原理,及其在水生态修复中的应用,认为磁化诱导效应可在水生动物种群优化、水生植物恢复、底泥修复等方面扮演重要角色,具有强化现有水生态修复技术修复效果、降低修复成本等优势。未来应对多种磁化参数、不同生物磁效应差异的机理、多种水生生物复合磁效应和大水体磁化方式的应用等开展进一步研究。

**关键词:**磁化诱导;技术应用;水生态修复

**中图分类号:**TV213.4      **文献标志码:**A      **文章编号:**1004-6933(2021)01-0132-08

**Application and prospect of magnetization induction technology in water ecological restoration** // ZHANG Lieyu<sup>1</sup>, ZHU Qiuheng<sup>1,2</sup>, LI Xiaoguang<sup>1</sup>, LI Guowen<sup>1</sup>, TANG Wenzhong<sup>3</sup>, ZHAO Chen<sup>4</sup> (1. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Basin Research Center for Water Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** This paper introduced the magnetization induction technology, principle, and its application in water ecological restoration, believing that the magnetization induction effect can play an important role in aquatic animal population optimization, aquatic plant restoration, and sediment restoration, with the advantages of strengthening the existing water ecological restoration technology and decreasing the restoration cost. In the future, further research should be carried out on the multiple magnetization parameters, the differences mechanism of different biological magnetic effect, multiple aquatic biological composite magnetic effects and the application of large water magnetization methods.

**Key words:** magnetization induction; technology application; water ecological restoration

修复受损水生态结构,重建水生态功能已成为目前生态文明建设中的重要一环。“十四五”期间是实现全面小康,迈向“清水绿岸、鱼翔浅底”美丽中国的重要时期。几十年来的水体污染已造成河湖等自然水体生态功能严重退化甚至丧失,动植物生境破坏严重<sup>[1]</sup>。2019年,京津冀地区262条河流中,水生态系统遭到破坏的高达80.2%,河湖水体的生物多样性和自净能力严重降低<sup>[2]</sup>。因此,水生态修复新技术的研发和应用尤为必要。水生态系统修复技术以恢复受损生态系统为导向,通过恢复生态系统中物种的群落结构,达到河湖水体“长治久

清”的效果,主要包括水生生物修复、底泥生物氧化、生物多样性调控等技术<sup>[3]</sup>。然而,现有水生态修复技术在应用中,种植的水生植物、投加的微生物等常受到外界环境和边界条件影响,修复效果极不稳定<sup>[4]</sup>。在粤港澳大湾区,合流制雨污溢流现象严重,人工种植的水生植物和引入的外源微生物常难以生存,水生态修复效果较差<sup>[5]</sup>。在长江经济带城市群中,部分河湖水体由于温度、水利条件等原因,水体生态结构严重失衡,仅通过人工种植水生植物、机械除藻等现有水生态修复技术难以全面抑制藻类暴发<sup>[6]</sup>。磁化诱导技术作为一种前瞻技术,直接作用于

基金项目:国家科技重大专项(2018ZX07110005);国家自然科学基金(51678549)

作者简介:张列宇(1981—),男,研究员,博士,主要从事流域水环境治理研究。E-mail: zhangly@craes.org.cn

通信作者:祝秋恒(1994—),男,博士研究生,主要从事流域水环境治理研究。E-mail: qiuheng\_zhu@163.com

水分子、污染物以及动植物机体,可产生一系列磁化效应,包括产生超氧自由基、影响动植物体内酶活性、提升水体纳氧和纳盐能力、提高水体透明度等<sup>[7]</sup>。这些效应不仅可直接去除水体污染物,也可刺激水生动植物的生长、代谢以及抗逆性,从而有望强化现有水生态修复技术,扩大其应用场景,提高修复效果。然而,目前对于磁化诱导技术的研究较少,在水生态修复领域中的应用也鲜有报道。本文将对现有磁化诱导技术的应用原理进行系统性总结和分析,结合其效应特点展望其在水生态修复中的应用,旨在为后续磁化诱导新技术在水生态修复中的应用提供参考。

## 1 磁化诱导技术及其原理

磁化诱导技术由于其高效、绿色、经济等特点逐渐进入各国研究人员视野,并掀起了磁化诱导技术的研究热潮<sup>[8]</sup>。水分子在经过磁场处理后,物化性质发生一系列变化,包括介电常数、折射率、黏度等,从而引起一系列的物理、化学以及生物磁效应,如除垢、杀菌、增产等<sup>[9]</sup>。在矿物的分选以及土木行业中,磁化诱导技术可显著提高金属离子的分离效果,强化混凝土密度<sup>[10]</sup>。在农业生产中,苏联专家通过磁化诱导技术显著提高了农作物产量和品质。在造纸、化工等行业的废水处理方面,磁化诱导技术可显著提高污染物的去除率和污染处理能力。我国关于磁化诱导技术的研究和应用始于20世纪90年代,颜幼平等<sup>[11]</sup>回顾了磁化诱导技术在工业水防垢方面取得一系列进展。随着几十年的研究和应用,磁化诱导技术在工业、农业、医学、水处理等行业的应用已取得了很大进展。磁化诱导效应主要分为物理、化学以及生物3个方面(图1)。

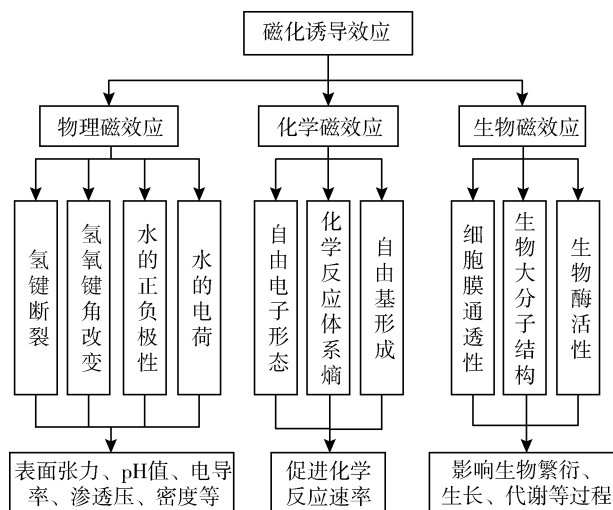


图1 磁化诱导效应

Fig. 1 Magnetization induction effect

### 1.1 物理磁效应

自然的水分子之间存在电偶极相互作用,并以氢键的方式缔合成大的水分子团。在地球的这个大磁场中,水分子间氢键的断裂和形成处于平衡状态。然而,水分子是一种极性分子,分子间会存在着电偶极作用。在给水分子施加额外的磁场并以一定流速流过时,水分子会受到洛伦兹力等作用力的影响,水分子的正负极性发生改变,从而改变了水的电荷<sup>[12]</sup>。大分子的水分子缔合集团内的氢键发生断裂,氢键平衡被打破,被切割成单个水分子<sup>[13]</sup>。研究发现经磁化后,水分子氢键的断裂存在阈值,当磁场低于200 mT时,主要引起的是水的内能变化,如氢氧键角的变化;一旦磁场强度超过200 mT,可引起氢键断裂,甚至打破整体水分子氢键的平衡<sup>[14]</sup>。因此,经磁场磁化后,水分子结构的变化会导致水的表面张力、pH值、电导率、渗透压、密度等发生显著变化<sup>[15]</sup>。也有研究发现,经磁化后的水分子光谱特性发生了改变,并导致水的黏度、凝固点、析蜡点等指标发生变化<sup>[16]</sup>。

### 1.2 化学磁效应

水分子及溶解在水中的溶质在磁场的作用下吸收了能量转化为内能,造成分子脱稳进入激发态,分子的碰撞概率大幅增加,从而加速了化学反应速率<sup>[17-18]</sup>。韩庆祥等<sup>[19]</sup>通过荧光发射峰和面积证实了自由电子在经过磁场后会脱稳并发生跃迁,进而影响化学反应体系的熵。研究发现,化学反应熵和速率的改变可显著影响水中污染物的去除效率,在涉及工业废水中金属离子的回收处理时,经磁化后的含金属离子废水不仅电解过程大幅提升,过程中发生浓差极化的概率也显著降低,从而大幅提高工业废水中金属离子的去除率<sup>[17]</sup>。溶液中的自由基受到磁场的影响,促进溶液中离子行为的电化学反应进程,这也是化学磁效应的主要体现<sup>[20]</sup>。孙静波<sup>[21]</sup>在通过磁场强化臭氧处理城市污水时发现,在磁场的作用下会影响自由基对转换成三重态的速度和程度,因而会脱稳进入激发态,从而提高化学反应速率,臭氧的氧化反应时间显著缩短(3 min以上)。此外,经磁化后产生的自由基可氧化分解水中的有机污染物,尤其是多环芳烃类、表面活性剂等难降解有机物,显著降低水体中有机污染物含量<sup>[11]</sup>。

### 1.3 生物磁效应

磁场对生物产生的效应——生物磁效应,主要包括两个方面:一方面,是磁场会直接作用于微生物的细胞结构,改变细胞膜的通透性、DNA结构等<sup>[22]</sup>。生物细胞膜控制膜内外物质的传质速率,直接影响生物的生长、代谢等过程<sup>[23]</sup>。许燕滨<sup>[24]</sup>发

现施加 100 mT 的外加磁场时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。通过外加磁场,生物膜内外钠、钾等离子的受力作用也发生了改变,进而影响离子的膜内外运输。也有研究<sup>[25]</sup>发现,在强磁场下,生物体的 DNA 等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。Shankay 等<sup>[26]</sup>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,并不是所有生物体的分子结构都会受到磁场的影响。李红等<sup>[27]</sup>就发现小鼠 DNA 在强磁场条件下结构依然稳定。因此,磁场影响生物大分子结构的机理还要进一步研究。另一方面,磁场可影响生物酶的活性。生物酶是生物体在环境中生长、代谢等过程中重要的调节物质,酶活性的改变可显著影响生物体的生命活动。然而,生物体产生的很多酶或蛋白质中由于含有金属原子,都具有趋磁性。因此,在施加磁场后,磁化会影响酶内自由电子的跃迁,打破分子内部的稳态,从而提高酶活性。有研究发现一些细菌体内含有 Fe 等金属离子,如杆菌、螺旋菌等,对磁场具有很高的敏感性<sup>[28]</sup>。在外加磁场后,磁场会通过影响酶活性影响生物体从生长到衰亡的全过程,包括生物体的形态、生长以及代谢等过程<sup>[29]</sup>。然而,生物酶有很多种类,磁场对不同种类生物酶产生的磁效应有很大差异,对生物体产生的生物磁效应也有很大差异。粟杰等<sup>[30]</sup>发现磁场强度在 100 ~ 500 mT 时,细菌中酶活性会受到严重抑制,而放线菌、真菌等的生长则受到激活。农光鲜等<sup>[31]</sup>也发现磁场对白色念珠菌中酶活性具有促进作用,但严重抑制葡萄糖菌的生长。磁场对于不同生物种类之间相同酶所产生的磁效应也存在很大差别。Amara 等<sup>[32]</sup>发现巨噬细胞放入磁场强度为 250 mT 的环境中时,其谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶没有发生改变。Zlotopolski 等<sup>[33]</sup>却发现鼠肾脏中的谷胱甘肽过氧化物酶和超氧化物歧化酶受到磁场严重抑制。

生物磁效应存在一个阈值,磁场强度达到阈值才能发现磁效应,且每种生物产生磁效应的阈值也有很大差异,这也是很多研究存在矛盾的重要原因。生物磁效应还具有滞后性和累积性,磁化时间与磁效应有很大关联,同时生物磁效应还与磁场参数,如强度、频率等有着密切关系。

## 2 磁化诱导技术在水生态修复中的应用

磁化诱导技术可应用于抑制藻类暴发、水生植物定向诱导恢复等,弥补现有水生态修复技术的不足。

### 2.1 水生动物种群优化

合理的水生动物群落结构是良好水生态的重要基础,也是河湖水生态功能的重要保障,对于维持健康的水生态系统尤为重要<sup>[34]</sup>。在水产养殖中,大量研究证明磁化诱导技术可显著影响水生生物尤其是大型鱼类的生长、繁殖、代谢等。姜景田等<sup>[35]</sup>采用 150 mT 磁场强度诱导草鱼、鲢鱼以及鳙鱼的鱼卵,使鱼卵内的孵化酶活性显著提升,鱼卵发育速度和孵化率提升了 6% 以上。Surendran 等<sup>[36]</sup>发现磁化诱导技术可提高与鱼类生长、代谢相关的酶(如淀粉酶等)活性,显著增强鱼类的活动能力以及摄食能力。章之蓉等<sup>[37]</sup>通过磁化诱导强化了罗非鱼在恶劣环境下(如无饵食、低溶氧、低温等)的生存能力;进一步研究<sup>[38]</sup>发现,磁化诱导技术可显著降低草鱼等鱼类的红细胞溶血率,全血黏度显著下降,并且加速了鱼类血液循环速度,缩短红细胞寿命,进而促进鱼类的生长和代谢,增强其免疫力以及抗逆性。然而,每种水生生物最适合的磁场诱导参数具有很大差异,产生的生物磁效应也有较大差别。刘宪亭等<sup>[39]</sup>发现磁化诱导技术对促进鱼类生长具有明显阈值,作用效果不与磁场强度、时间等参数呈线性关系。因此,可利用不同水生生物的最适磁化参数定向调控水生生物物种结构,以恢复健康的水生态系统。

水污染不仅带来了过量的氮、磷、有机物等污染物,也会造成病原菌污染。鱼类等大型水生生物易受到病毒、细菌、真菌等病原菌的感染,产生腐鳍病等疾病,造成水生生物种群平衡破坏。磁化诱导技术不仅可直接作用于生物体,控制其生长、代谢等相关酶的活性,同时也会产生超氧化自由基,这些自由基的产生可显著抑制水体中病原微生物的生长,降低水生生物患病概率,为水生生物提供更适宜的生境。渗透压是水生动物运动的主要力量,水生动物细胞与河湖水体的渗透压之差对水生动物生长、繁殖具有重要影响<sup>[40]</sup>。磁化诱导技术可通过作用于水分子结构,增大水体渗透压,来促进水生动物生长、代谢、繁殖等。

### 2.2 水生植物恢复

水生植物占据着水生态系统中重要的生态位,不仅为水生动物提供了栖息场所和食物,也是水体污染物去除的重要贡献者。水生植物尤其是沉水植物的恢复,已成为我国河湖等自然水体生态治理的关键措施<sup>[41]</sup>。水生植物主要有沉水植物、挺水植物、浮叶植物和漂浮植物 4 种。水生植物不仅可净化水体污染物,还可提高水生态质量,促进水体功能恢复<sup>[42]</sup>。国内外大量的研究证实植物经磁场诱导后,其 DNA 的转录和表达、光合作用、呼吸速率等方面均有显著变化,植物的萌发率、生长率、抗逆性物

质含量等大幅提升(表1)<sup>[43-44]</sup>。在河湖生态修复中,通过磁化诱导技术诱导水生植物恢复,有望提高其种子萌发率、促进生长发育、提高抗逆性、降低种植密度等,从而强化水生植物对水体污染物的去除效率,增强人工湿地、生态浮岛等以植物作用为主的生态处理技术的污染物处理效率。

**a. 提高发芽率。**通过磁化诱导技术诱导植物种子,可显著提高种子发芽率。胡弟文<sup>[45]</sup>发现磁场强度在 500 mT 时可强化种子的呼吸作用,提高种子中淀粉、蛋白质等营养物质的转化,从而提升种子的发芽率和活力。何兴华等<sup>[46]</sup>也通过磁化诱导技术使水稻发芽率提高了 34%,而大豆的发芽率更是提高了 70% 以上。

**b. 促进植物生长。**磁化诱导不仅可影响植物种子的萌发期,也会影响植物幼苗期甚至整个生命过程。很多研究证明磁化诱导技术可促进植物根系生长,增大植物汲取营养的面积,大幅促进植物的生长和代谢。研究发现在磁场强度为 83.5 mT 时,紫苏根系活力显著提升,达到了 0.76 mg/h<sup>[47]</sup>。汪耀富等<sup>[48]</sup>将烟草经过磁化水处理后,植物根系发达,株高等指标提高了 20% 以上。也有研究发现磁化水大幅提高了葡萄中硝酸盐还原酶等氮代谢主要功能酶的活性,促进了植物体内的氮代谢<sup>[49]</sup>。

**c. 提高抗逆性。**植物抗逆性物质的生成有助于植物在环境恶劣条件下的生长。已有研究发现植株经磁化处理后,体内的过氧化氢酶、过氧化物酶等抗逆性物质的活性显著提升( $P < 0.05$ ),提高了植物抵抗极端环境的能力<sup>[50]</sup>。陈全光<sup>[51]</sup>发现樟子松等植株经磁化处理后超氧化歧化酶活性显著提升,丙二醛含量降低。在水生态修复中,外界条件不稳定,水生植物修复技术效果极其不稳定。通过磁化诱导技术提高水生植被的抗逆性,有望强化水生态修复技术的修复效果。

**d. 降低种植密度。**植株在经过磁化处理后,植物根系更加发达,抗逆性增强,体内的酶活性更高,最终可提高植物株高、枝条数等。已有研究<sup>[52]</sup>发

现,通过磁化作用,作物株高、果枝数等提高了 20% 以上,显著提升小麦的产量。结合磁化诱导技术,可在进行人工恢复水生植物时,降低水生植物的种植密度,从而降低成本。

### 2.3 抑制藻类暴发

藻类大规模暴发,不仅严重影响水生态系统平衡,也严重影响人类用水需求,是河湖生态治理的重点和难点,故抑制藻类暴发一直备受关注<sup>[53]</sup>。目前,藻类治理技术短期主要依靠物化方法,虽可快速且有效去除水体藻类,但化学处理会给水生态系统造成不可逆的损伤,而物理处理费时费力、效率不高。长期治理主要是通过生物调控技术,如种植水生植物等,限制藻类生长。然而,水生动植物的生长易受外界环境条件如透明度、溶解氧等的影响,导致藻类抑制效果较差。

磁化诱导技术作为一种新型水生态修复技术,可通过磁化效应直接作用于藻类细胞的酶活性,影响生物膜的通透性,快速抑制甚至杀死藻细胞<sup>[54]</sup>。相较于化学药剂,其对环境更加友好。高等水生植物与藻类属于同一生态位,都属于初级生产者,存在生存竞争机制。磁化诱导技术可定向强化高等植物的生长,促进高等植物“化感物质”的释放,从而抑制藻类生长。此外,磁化诱导技术可强化水生生物的生长、代谢等,提高鱼类对环境因素的抗逆性,促进鱼类等水生生物对藻类的觅食,有可能解决藻类大规模暴发的问题。

### 2.4 底泥修复

河湖等自然水体的底泥在长期接纳上覆水中各种污染物后,底泥中污染物含量远高于上覆水<sup>[55-56]</sup>。随着水环境治理稳步推进,我国河湖水质改善效果明显,底泥逐渐成为污染河湖水体重要的污染源之一。长期污染已导致水体底部生物群落功能性丧失,生态系统严重破坏。在水生态修复过程中,底泥修复成了关键措施之一<sup>[57]</sup>。目前,底泥修复大多采用生态清淤(异位修复)、投加化学稳定剂固化底泥中污染物(原位修复)等,会一定程度上去

表 1 磁化诱导技术对植物的影响

Table 1 Effects of magnetization induction technology on plants

植物种类	磁化参数		磁化效应	参考文献
	磁场强度/mT	磁化时间/s		
湿地松、马尾松、柳杉、杉木种子	0.2 ~ 1.0	60 ~ 360	种子发芽率提升 40% 以上, CAT 等抗氧化酶活性提高 50% 以上	[42]
玉米、小麦、辣椒、葫芦、苦瓜	0 ~ 0.4		种子发芽率提升 15% 以上, 根冠比提升 20% 以上	[43]
紫苏	20 ~ 100	3 600 ~ 18 000	真叶展开率提高 112%, 根系活力提高 240%	[44]
烟草	100		种子发芽势提高 9%, 发芽率提高 6%; 根系比表面积提高 6.3%	[45]
葡萄	500		植物全氮含量提升 56.88% ~ 315.58%	[46]
樟子松、长白落叶松	0.2 ~ 1.2	600 ~ 3 600	发芽势提高 4 倍以上, 大幅提高植物抗逆性	[48]
芹菜、豌豆	3.5 ~ 136		产量提高 10% 以上	[49]

除/抑制底泥中污染物释放到上覆水中。然而,这些技术都会不同程度破坏原有水生态系统结构和功能。因此,寻找一种绿色、环境友好、经济的底泥修复技术尤为重要。磁化诱导技术相较于现有底泥修复技术,可在不破坏原有水生态系统的基础上,进行高效、绿色的修复。

**a. 底泥微生物群落修复。**长期的河湖水污染造成底泥微生物群落结构单一,部分功能丧失。通过磁化诱导技术可定向增强功能性微生物生长、代谢和繁殖,提高生物多样性,进而促使恢复底泥微生物群落的生态功能。Geng 等<sup>[58]</sup>发现通过磁化诱导后,SBR 反应器微生物多样性提升了 12% 以上,对 TN 等污染物的去除率大幅提高。

**b. 底泥中污染物消减。**隋卫燕等<sup>[59]</sup>发现磁场可提高活性污泥中酶活性,如提高肌酸激酶、尿酶、乳酸脱氢酶等的活性,氧化性提高了 22%,废水处理效率显著提升 44%,其中有机物去除率提升 15% 以上。倪健源<sup>[60]</sup>发现磁场可强化活性污泥对 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除,污染物的去除率提升了 20%。同时,在磁场作用下,水分子之间的氢键作用减弱甚至是断裂,减少了水分子间的作用力,将大分子水分子缔合团切割成小分子,促进了活性氧(包括羟基自由基、超氧自由基等)的产生。这些活性基团具有强氧化性,可有效降解水中的有机物等污染物,尤其是难以生物降解的物质。席婷婷<sup>[61]</sup>发现磁化产生的超氧自由基显著提高了城市污水中可溶性 COD 去除率(35%),并且有效提高污水的透光率。此外,磁场不仅可作用于水分子,也对水分子中溶质产生影响,尤其是对以碳、氢、氧等以各种形式结合的有机物。有研究发现在磁场作用下,有机物相邻分子会疏远,分子间的 C-C/C-H 等共价键产生的凝聚力减弱,甚至是长链有机物分子断链。Cai 等<sup>[62]</sup>研究发现在磁场的作用力下,溶解在水中的有机物会吸收能量,将分子从稳态转化到激发态,从而加速了有机物的矿化。因此,通过磁化诱导技术可增强底泥中分解者污染物降解相关的酶活性,促进其生长和代谢,从而大幅提高底泥中污染物的降解速率,削减河湖水体自生污染源的贡献。

**c. 底泥沉降性。**随着大量污染物排放到河湖水体中,底泥中有机质含量不断增大,出现底泥难沉降、体积大、易翻泥等现象,严重危害水环境。底泥的沉降性以及松散程度与 Zeta 电位等静电力的作用密切相关。已有研究<sup>[63]</sup>发现,磁化诱导技术可显著降低污泥表面的 Zeta 电位,污泥容积指数降低至 100 mL/g,污泥沉降性大幅提高。因此,可利用磁化诱导技术大幅削减河湖水体底部淤泥体积,有效抑

制城市黑臭河道翻泥现象。

### 3 磁化诱导技术在水生态修复领域的研究展望

水生态修复涉及动物、植物等多个物种及其生境的修复,极其复杂<sup>[64]</sup>。磁化诱导技术虽在农业等行业涉及,但目前在水生态修复方面的研究较少。磁化诱导技术在后续水生态修复领域中的研究应着重关注以下几个方面。

#### 3.1 对多种磁化参数的深入研究

现阶段,磁化诱导技术的研究与应用的磁场强度集中在 0.5 T 以下,研究的磁场强度范围较窄。磁场带来的物理、化学以及生物效应往往以多级值呈现,而现有的磁场强度已远远不能满足需求。因此,在后期水生态修复的研究中,磁场强度的研究范围应进一步扩大。影响磁化效应的不仅是磁场强度,还包括磁化时间、磁场频率等,这些磁化参数均需进一步细化研究。

#### 3.2 不同生物磁效应差异的机理研究

同样的磁场强度对不同种类的生物产生的磁效应差异很大,需进一步探究生物磁效应存在差异的机理。同时,为了后续研究能够更加深入,应用更加广泛,应对产生的磁效应按生物种类归类总结,以方便后续技术的应用和实施。此外,由于自然水体的复杂性,磁场对自然水生态系统的影响尚不可知,因此对磁场短期和长期的生物学效应也应给予更多关注。

#### 3.3 多种水生生物复合磁效应的研究

水体生态修复是以水生态系统结构和功能为主体目标,并不针对某一种或几种水生生物。因此,磁化诱导技术用于水体生态修复时,不仅需考虑磁化诱导对目的水生生物的影响,同时也要考虑对生态系统其他物种的影响。目前磁化诱导效应对水生态系统整体影响的研究较少,后续还要对磁化诱导效应对多种水生生物复合效应的影响进行深入探究。

#### 3.4 大水体磁化方式的应用研究

在已有的工业或农业的磁化技术应用中,水质稳定、磁化水量小是现有技术的共同特点。因此,过去的研究中主要是采用永磁式磁铁进行磁化,具有低成本、无须维护等特点。然而在面对水量较大的河湖等自然水体时,现有的磁化方式已远远不能满足处理量和处理效率需求。同时,相较于工业和农业用水,自然河湖水体复杂程度更高,现有磁化诱导技术参数和实施方式有很大的局限性。因此,针对河湖等大水体,还需进一步深入研究经济、有效的磁化方式。

## 参考文献:

- [ 1 ] 黄晓霞,江源,熊兴,等. 水生态功能分区研究[J]. 水资源保护,2012,28(3):22-27. (HUANG Xiaoxia,JIANG Yuan,XIONG Xing, et al. Study of aquatic eco-functional zoning[J]. Water Resources Protection,2012,28(3):22-27. (in Chinese))
- [ 2 ] 祝秋恒,李斌,刘丹妮,等. 关于规范黑臭水体治理的全过程管理分析[J]. 环境保护,2018,46(17):20-23. (ZHU Qiuheng, LI Bin, LIU Danni, et al. Study on standardize whole process management of urban black and odorous water bodies treatment [ J ]. Environmental Protection,2018,46(17):20-23. (in Chinese))
- [ 3 ] ZHEN L, ISHWARAN N, LUO Q, et al. Role and significance of restoration technologies for vulnerable ecosystems in building an ecological civilization in china [J]. Environmental Development,2020,34:100494.
- [ 4 ] 朱党生,张建永,李扬,等. 水生态保护与修复规划关键技术[J]. 水资源保护,2011,27(5):59-64. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LI Yang, et al. Key technologies for aquatic ecosystem protection and rehabilitation planning [ J ]. Water Resources Protection, 2011,27(5):59-64. (in Chinese))
- [ 5 ] 张列宇,王浩,李国文,等. 城市黑臭水体治理技术及其发展趋势[J]. 环境保护,2017,45(5):62-65. (ZHANG Lieyu, WANG Hao, LI Guowen, et al. Management technology and development trend for urban black and odorous water body [ J ]. Environmental Protection, 2017, 45(5):62-65. (in Chinese))
- [ 6 ] 王晓红,张艳春,张萍. 海绵城市建设中河湖水系的保护与生态修复措施[J]. 水资源保护,2016,32(1):72-74. (WANG Xiaohong, ZHANG Yanchun, ZHANG Ping. Conservation and ecological restoration of lake and river in sponge city construction [ J ]. Water Resources Protection, 2016,32(1):72-74. (in Chinese))
- [ 7 ] LYU M, ZHANG Z, ZENG J, et al. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment [ J ]. Separation and Purification Technology,2019,212:337-343.
- [ 8 ] HUANG T, ZHANG G, ZHANG N, et al. Pre-magnetization by weak magnetic field enhancing Fe<sup>0</sup>-Fenton process for wastewater treatment [ J ]. Chemical Engineering Journal,2018,346:120-126.
- [ 9 ] GABRIELLI C, JAOUHARI R, MAURIN G, et al. Magnetic water treatment for scale prevention [ J ]. Water Research,2001,35(13):3249-3259.
- [ 10 ] NARMATHA M, ARULRAJ P, ABDUL Bari J. Effect of magnetic water treatment for mixing and curing on structural concrete [ J ]. Materials Today: Proceedings, 2020,29:341-348.
- [ 11 ] 颜幼平,周为吉,康新宇. 高梯度磁分离技术在环境保护中的应用[J]. 环境保护科学,1999(3):9-12. (YAN Youping, ZHOU Weiji, KANG Xinyu. Application of GHMS technology for environmental protection [ J ]. Environmental Protection Science, 1999 ( 3 ) : 9-12. (in Chinese))
- [ 12 ] LI X, WANG C, ZHANG J, et al. Preparation and application of magnetic biochar in water treatment: a critical review [ J ]. Science of the Total Environment, 2020,711:134847.
- [ 13 ] BARESEL C, SCHALLER V, JONASSON C, et al. Functionalized magnetic particles for water treatment [ J ]. Heliyon,2019,5(8):2325.
- [ 14 ] SHIMOKAWA S, YOKONO T, MIZUNO T, et al. Effect of far-infrared light irradiation on water as observed by X-ray diffraction measurements [ J ]. Japanese Journal of Applied Physics,2004,43(4):545-547.
- [ 15 ] 庞晓峰,邓波. 水在磁场作用后的特性变化研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2008(9):1205-1213. (PANG Xiaofeng, DENG Bo. Research on the characteristics of water after the action of magnetic field [ J ]. Scientia Sinica:Physica, Mechanica & Astronomica, 2008(9):1205-1213. (in Chinese))
- [ 16 ] 胡晖,高红,贾绍义. 磁场对物质理化性质的影响[J]. 磁性材料及器件,2000(3):36-41. (HU Hui, GAO Hong, JIA Shaoyi. Effect of magnetic field on physical and chemical properties of materials [ J ]. Journal of Magnetic Materials and Deuices,2000(3):36-41. (in Chinese))
- [ 17 ] VEDAVYASAN C, VEDAVYASAN C. Potential use of magnetic fields: a perspective [ J ]. Desalination,2001,134(3):105-108.
- [ 18 ] CHO Y I, LEE S. Reduction in the surface tension of water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangers [ J ]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2005,32(1):1-9.
- [ 19 ] 韩庆祥,邵凤琴. 磁场对活性污泥法处理废水的强化作用[J]. 抚顺石油学院学报,2002(3):8-10. (HAN Qingxiang, SHAO Fengqin. The increasing effect of magnetic field on wastewater treatment by activated sludge process [ J ]. Journal of Liaoning Shihua University, 2002 ( 3 ) : 8-10. (in Chinese))
- [ 20 ] 蒋秉植,杨健美. 磁场效应影响化学反应研究的概况及前景[J]. 化学进展,1992(2):15-36. (JIANG Bingzhi, YANG Jianjian. Overview and prospects of the research on the effects of magnetic field effects on chemical reactions [ J ]. Progress in Chemistry,1992(2):15-36. (in Chinese))
- [ 21 ] 孙静波. 磁场臭氧复合强化混凝深度处理技术研究 [ D ]. 青岛:青岛理工大学,2009.
- [ 22 ] 朱杰. 磁场的生物学效应及其机理的研究 [ J ]. 生物磁学,2005(1):26-29. (ZHU Jie. Study on the biological effects of magnetic fields and its possible mechanisms [ J ].

- Biomagnetism,2005(1):26-29. (in Chinese))
- [23] 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.
- [24] 许燕滨. 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.
- [25] AMARA S, ABDELMELEK H, GARREL C, et al. Influence of static magnetic field on cadmium toxicity: Study of oxidative stress and DNA damage in rat tissues [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2006,20(4):263-269.
- [26] SHANKAY 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 & Medicine,2014,33(2):154-158.
- [27] 李红,胡道道,房喻,等. 磁场对大分子构象的影响研究进展[J]. 高分子通报,2005(5):108-113. (LI Hong, HU Daodao, FANG Yu, et al. Research progress of magnetic field effect on macromolecular conformation[J]. Polymer Bulletin,2005(5):108-113. (in Chinese))
- [28] 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(6):812-814. (LI Jie, YI Yanli, ZHANG Dageng, et al. Effect of magnetic field on soil microbes and soil enzyme activities in brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science,2004(6):812-814. (in Chinese))
- [29] 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.
- [30] 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(5):957-961. (LI Jie, YI Yanli, JIAO Ying, et al. Effect of magnetic field on soil microbes and soil enzyme activities in brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science,2007(5):957-961. (in Chinese))
- [31] 农光鲜,张帮猷,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):38. (NONG Guangxian, ZHANG Bangxian, HUANG Cuibo. The effect of magnetic field on *Candida albicans*, *Staphylococcus* and *Escherichia coli* [J]. Chinese Journal of Physical Therapy,2001(1):38. (in Chinese))
- [32] AMARA S, DOUKI T, RAVANAT J, 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.
- [33] ZLOTOPOLSKI V. The impact of magnetic water treatment on salt distribution in a large unsaturated soil column[J]. International Soil and Water Conservation Research,2017,5(4):253-257.
- [34] 刘凌,朱燕,李博韬,等. 基于 MBFG 分类法的长江江苏段浮游植物生物完整性评价[J]. 水资源保护,2020,36(4):13-20. (LIU Ling, ZHU Yan, LI Botao, et al. Assessment of phytoplankton biological integrity in Jiangsu section of Yangtze River based on MBFG [J]. Water Resources Protection,2020,36(4):13-20. (in Chinese))
- [35] 姜景田,李秋,邹胜利. 磁化水对家鱼胚胎发育的影响[J]. 黑龙江水产,2004(3):40-42. (JIANG Jingtian, LI Qiu, ZOU Shengli. Effect of magnetized water on the development of domestic fish embryos [J]. Fisheries of Heilongjiang,2004(3):40-42. (in Chinese))
- [36] SURENDRAN U, SANDEEP O, JOSEPH E. The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics [J]. Agricultural Water Management,2016,178:21-29.
- [37] 章之蓉,谢瑞生,肖丽莹,翁少萍. 磁场和磁场处理水对罗非鱼生长的影响[J]. 热带海洋,1987(1):91-93. (ZHANG Zhirong, XIE Ruisheng, XIAO Liying, WENG Shaoping. Effects of magnetic field and the water treated by magnetic field on the growth of *Oreochromis nilotica* [J]. Tropical Ocean,1987(1):91-93. (in Chinese))
- [38] 翁少萍,章之蓉,何建国. 磁场处理水对草鱼血液及鲤鱼红血球溶解的影响[J]. 中山大学学报论丛,1992(3):72-77. (WENG Shaoping, ZHANG Zhirong, HE Jianguo. Effects of magnetized water on blood of *Ctenopharyngodon idellus* and hemolysis of *Cyprinus carpio* [J]. Sun Yatsen University Forum,1992(3):72-77. (in Chinese))
- [39] 刘宪亭,鲁大椿,孙小异,付朝君. 磁水对莫桑鼻克罗非鱼生长的作用效果[J]. 淡水渔业,1981(3):34-37. (LIU Xianting, LU Dachun, SUN Xiaoyi, FU Chaojun. The effect of magnetic water on the growth of Mozambique tilapia [J]. Freshwater Fisheries,1981(3):34-37. (in Chinese))
- [40] SHUI C, SHI Y, HUA X, et al. Serum osmolality and ions, and gill  $Na^+/K^+$ -ATPase of spottedtail goby *Synechogobius ommaturus* in response to acute salinity changes [J]. Aquaculture and Fisheries,2018,3(2):79-83.
- [41] 王寿兵,徐紫然,张洁. 滇池高等沉水植物 50 年变迁状况对生态修复的启示[J]. 水资源保护,2016,32(6):1-5. (WANG Shoubing, XU Ziran, ZHANG Jie. Dynamic changes of higher submerged macrophytes in Dianchi Lake in recent 50 years and implication for ecological restoration [J]. Water Resources Protection,2016,32(6):1-5. (in Chinese))
- [42] LI Y, CHEN Z, GU N. In vitro biological effects of magnetic nanoparticles [J]. Chinese Science Bulletin, 2012,57(31):3972-3978.
- [43] LI X, LIU X, LIN C, et al. Activation of peroxymonosulfate by magnetic catalysts derived from drinking water treatment residuals for the degradation of atrazine [J].

- Journal of Hazardous Materials, 2019, 366:402-412.
- [44] CHIBOWSKI E, SZCZESÍ A. Magnetic water treatment: a review of the latest approaches[J]. Chemosphere, 2018, 203:54-67.
- [45] 胡弟文. 磁场对几种针叶树种种子活力的影响[D]. 福州:福建农林大学, 2013.
- [46] 何兴华, 程昌明, 陈杰. 磁化水对作物种子的生物效应研究[J]. 西南农业大学学报, 2003(2):120-122. (HE Xinghua, CHENG Changming, CHEN Jie. Biological effects of magnetized water for crop seeds[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2003(2):120-122. (in Chinese))
- [47] 王计平, 史华平, 张玲慧, 等. 磁场处理紫苏种子的生物学效应[J]. 核农学报, 2013, 27(11):1670-1674. (WANG Jiping, SHI Huaping, ZHANG Linghui, et al. Biological effects on perilla frutescens seed treated with magnetic field[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(11):1670-1674. (in Chinese))
- [48] 汪耀富, 晁逢春, 杨铁钊. 磁化水对烟草生长发育及生理特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 1998(3):3-5. (WANG Yaofu, CHAO Fengchun, YANG Tiezhao. Influence of magnetized water on growth and development and physiological characteristics of flue-cured tobacco[J]. Journal of Henan Agricultural University, 1998(3):3-5. (in Chinese))
- [49] 朱红, 孔令刚, 张志浩, 等. 磁化处理促进施氮条件下葡萄氮素的代谢和分布[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(4):535-544. (ZHU Hong, KONG Linggang, ZHANG Zhihao, et al. Effect of applying nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism and distribution in grapevine under magnetic treatment of water[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(4):535-544. (in Chinese))
- [50] HU B, WANG Y, QUAN J, et al. Effects of static magnetic field on the performances of anoxic/oxic sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2020, 309:123299.
- [51] 陈全光. 磁场强度处理对樟子松和长白落叶松抗逆性的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2012.
- [52] MAHESHWARI B L, GREWAL H S. Magnetic treatment of irrigation water: its effects on vegetable crop yield and water productivity[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8):1229-1236.
- [53] 朱喜, 李贵宝, 王圣瑞. 太湖蓝藻暴发的治理[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):106-111. (ZHU Xi, LI Guibao, WANG Shengrui. Treatment of blue algae outbreak in Taihu Lake[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):106-111. (in Chinese))
- [54] 赵旭, 王茹静, 曹瑞钰, 等. 高强磁技术在景观水体中灭藻的应用研究[J]. 净水技术, 2006, 25(1):55-57. (ZHAO Xu, WANG Rujing, CAO Ruiyu, et al. Study on the effects of magnetization on landscape water treatment [J]. Water Purification Technology, 2006, 25(1):55-57. (in Chinese))
- [55] 郝永飞, 金光球, 唐洪武, 等. 淮河干流典型污染物时空分布特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4):291-299. (HAO Yongfei, JIN Guangqiu, TANG Hongwu, et al. Spatial and temporal distribution analysis of typical contaminants in mainstream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(4):291-299. (in Chinese))
- [56] 李志伟, 丁凌峰, 唐洪武, 等. 淮河干流污染物分布及变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1):29-38. (LI Zhiwei, DING Lingfeng, TANG Hongwu, et al. Distribution and variation of pollutants in main stream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1):29-38. (in Chinese))
- [57] 方红卫, 李晓翠, 黄磊, 等. 受污染底泥陶粒化回填技术及其底泥修复效果[J]. 水资源保护, 2019, 35(3):1-6. (FANG Hongwei, LI Xiaocui, HUANG Lei, et al. Ceramization of contaminated sediment backfill technology and its effects of sediment remediation [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3):1-6. (in Chinese))
- [58] GENG S, FU W, CHEN W, et al. Effects of an external magnetic field on microbial functional genes and metabolism of activated sludge based on metagenomic sequencing[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):8818.
- [59] 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 Weiyan, SONG Peng, HAN Tiantian, 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. (in Chinese))
- [60] 倪健源. 恒定磁场对好氧活性污泥性能的影响[D]. 济南:山东大学, 2012.
- [61] 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.
- [62] CAI J, WANG L, WU P, et al. Study on oxygen enrichment from air by application of the gradient magnetic field[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(3):171-181.
- [63] 周正. 磁化处理对污泥胶体稳定性及其吸附性能影响的初步研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2007.
- [64] 吴兆丹, 华钰, 吴奕卓, 等. 科技支撑江淮生态大走廊水环境治理的问题与路径[J]. 水利经济, 2020, 38(1):68-73. (WU Zhaodan, HUA Yu, WU Yizhuo, et al. Problems and paths of water environment governance of Yangtze River and Huaihe River (Jianghuai) Ecological Corridor under scientific and technological support [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(1):68-73. (in Chinese))

(收稿日期:2020-07-17 编辑:彭桃英)