

# 纳米零价铁在水体富营养化治理中的应用

马子龙, 肖 洋

重庆科技大学土木与水利工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年7月5日; 录用日期: 2024年8月7日; 发布日期: 2024年8月14日

## 摘要

水体富营养化现象不仅威胁着水生态系统的平衡, 还对人类健康、经济发展构成了严重挑战, 工业废水和生活污水中的营养物质通过城市排水系统进入水体, 增加了水体中的氮、磷等营养物质浓度, 导致富营养化问题日益严重。纳米零价铁在水体富营养化中的应用潜力得到了广泛关注。文章评述了纳米零价铁在水体富营养化治理中的应用。首先指出了水体富营养化现象对生态系统和人类健康的威胁, 随后介绍了纳米零价铁的制备方法和表征技术, 以及其在水体治理中的独特优势和局限性, 呼吁进一步加强相关研究以解决这些问题。最后进一步探讨未来展望和发展趋势, 通过不断创新和技术提升, 纳米零价铁有望为改善水体生态环境、保障人类健康和促进社会经济发展做出更为显著的贡献, 推动水体富营养化治理技术向着更加高效、可持续的方向发展。文章以期为纳米材料在水体富营养化中的应用研究提供相关参考。

## 关键词

纳米零价铁, 水体富营养化, 应用研究

# The Use of Nanoscale Zero-Valent Iron for the Remediation of Water Body Eutrophication

Zilong Ma, Yang Xiao

School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jul. 5<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 7<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 14<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The phenomenon of water body eutrophication not only threatens the balance of aquatic ecosys-

tems, but also poses serious challenges to human health and economic development. Nutrients in industrial wastewater and domestic sewage enter water bodies through urban drainage systems, increasing the concentration of nutrients such as nitrogen and phosphorus in water bodies, leading to increasingly serious eutrophication problems. The potential application of nanoscale zero-valent iron in water body eutrophication has received widespread attention. This article reviews the application of nanoscale zero-valent iron in water body eutrophication treatment. Firstly, the threat of water body eutrophication to ecosystems and human health was pointed out. Then, the preparation methods and characterization techniques of nanoscale zero-valent iron were introduced, as well as their unique advantages and limitations in water treatment. It was called for further strengthening of relevant research to address these issues. Finally, we will further explore future prospects and development trends. Through continuous innovation and technological advancement, nanoscale zero-valent iron is expected to make more significant contributions to improving the ecological environment of water bodies, ensuring human health, and promoting socio-economic development. This will promote the development of water body eutrophication treatment technology towards a more efficient and sustainable direction. This article aims to provide relevant references for the application research of nanomaterials in water body eutrophication.

## Keywords

Nanoscale Zero-Valent Iron, Water Body Eutrophication, Application Research

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

随着全球经济和人口的不断增长,水体富营养化成为当今世界面临的重要环境问题之一。水体富营养化是指水体中营养物质(如氮、磷等)过度富集的现象[1]-[3]。工业废水和生活污水中的营养物质通过城市排水系统进入水体,增加了水体中的营养物质浓度,在多种因素的共同作用下,水体富营养化问题日益严重,威胁到水体生态系统的健康与可持续发展[4]。这种现象的普遍性不仅给水生态系统带来了巨大的压力,还对人类健康、经济发展和社会稳定构成了严重威胁。因此,寻找有效的水体富营养化治理方法非常重要。

在过去的研究中,纳米材料作为一种新兴的治理材料,受到了广泛关注。其中,纳米零价铁具有比表面积大,反应活性高等特点,在水体富营养化治理中的应用潜力引起了广泛关注。相较于传统的水体治理材料,纳米零价铁具有更高的去除效率和更低的剂量要求,且能够在水体中实现局部治理,减少了对环境的影响。过去的研究表明,纳米零价铁在水体富营养化治理中具有良好的应用前景,其主要作用包括吸附、还原和沉淀等过程,可以有效去除水体中的磷、氮等营养物质。然而,纳米零价铁在水体富营养化治理中的实际应用还存在一些挑战,如制备方法的优化、长期稳定性和不同水体环境的适用性等问题亟待解决。在这个背景下,本文对纳米零价铁的制备和表征技术进行介绍,分析其优势和局限、并进一步探讨未来展望和发展趋势,旨在为水体富营养化治理技术的创新与发展提供相关参考。

## 2. 纳米零价铁的制备和表征技术

### 2.1. 纳米零价铁概述

纳米零价铁(nano Zero-Valent Iron, nZVI),是一种典型的纳米材料,其颗粒直径约为1到100 nm,已

被广泛认可为一种优异的环境修复材料[4]。其具有较高的比表面积、强大的吸附能力和高度的还原性,因此在环境领域的应用备受瞩目,在水体治理领域有着广阔的工程应用前景。利用纳米铁颗粒的表面效应和纳米效应,可明显提升其反应的活性和处理效率。

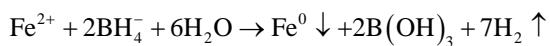
## 2.2. 纳米零价铁的制备方法

近年来,对纳米零价铁的制备方法进行了多种探索,其选择和所用表征技术影响其在处理蓝藻水华等问题中的效果。因此,本节将重点介绍纳米零价铁的常用制备方法和表征技术。液相还原法和高能球磨法是制备纳米零价铁的常见制备方法。

### 2.2.1. 液相还原法

硼氢化钠(NaBH<sub>4</sub>)是一种强还原剂,被应用于制备非晶态合金颗粒已有半个多世纪的历史。液相还原法是一种常用的制备方法,其基本原理是在惰性气体(如氮气或氩气)的保护下,利用强还原剂BH<sub>4</sub><sup>-</sup>将Fe<sup>2+</sup>或Fe<sup>3+</sup>还原为零价铁,从而制备纳米零价铁,实验室制备通常选择NaBH<sub>4</sub><sup>-</sup>或KBH<sub>4</sub><sup>-</sup>溶液作为还原剂,通过在液相环境中进行反应来实现[5] [6]。

采用化学还原法制备纳米零价铁,即用强还原剂硼氢化钠,在含有三价或二价铁离子溶液中将金属离子还原出来[7]。化学反应方程式如下:



### 2.2.2. 高能球磨法

高能球磨法是一种在没有外部热能供给的情况下进行的球磨过程,也是将大晶粒转变为小晶粒的过程。其基本原理是通过高能球磨机长时间的旋转运转,将机械能传递给金属粉末,在低温条件下反复挤压和破碎,从而使其逐渐成为均匀分散的超细粒子[8] [9]。

## 2.3. 纳米零价铁的表征技术

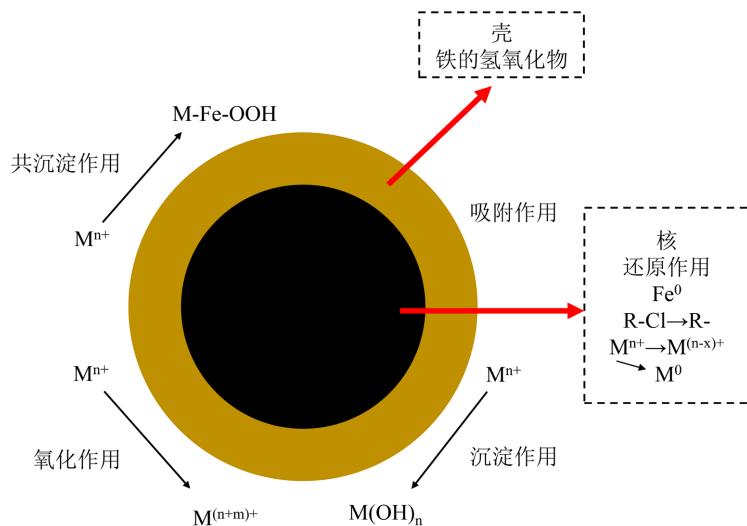
为了确保纳米零价铁的质量和性能,需要借助一系列表征技术对其进行全面的表征。常用的表征技术包括透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和比表面积分析等。这些技术可以有效地表征纳米零价铁的形貌、晶体结构和比表面积等重要参数,为其在水体富营养化治理中的应用提供可靠的技术支持。

## 3. 纳米零价铁在水体富营养化治理中的优势和局限

纳米零价铁作为一种新兴的水体富营养化治理材料,具有许多优势,但同时也面临着一些局限。相比于传统的单质铁,纳米零价铁具有更小的尺寸、更大的比表面积和更高的反应活性,因此在污染物去除方面得到了广泛应用,纳米零价铁去除污染物的机制主要包括还原、沉淀、共沉淀、吸附和氧化等作用,其中以还原作用为主[10]。纳米零价铁的结构和反应原理如图1[10]所示。

### 3.1. 纳米零价铁的优势

- 1) 高效去除营养物质: 纳米零价铁具有较大的比表面积和丰富的活性位点,能够高效吸附和还原水体中的营养物质。
- 2) 可控性强: 制备过程中可以通过调控反应条件和材料性质,实现对纳米零价铁颗粒大小、形貌和表面性质的精确控制。
- 3) 相比于传统的单质铁材料,纳米零价铁尺寸更小,颗粒直径仅为1到100 nm,比表面积更大,反应活性更高。



**Figure 1.** [10] Nano Zero-Valent iron: Structural model and reaction mechanisms  
**图 1.** [10] 纳米零价铁结构模型和反应原理

### 3.2. 纳米零价铁的局限性

- 1) 易团聚: 由于纳米零价铁颗粒具有较高的表面能和活性, 发生颗粒之间的吸附和凝聚, 这种团聚现象会降低纳米零价铁的比表面积和活性, 限制其在水体中的有效分散和利用。因此, 需要通过控制制备条件、表面改性等手段, 防止纳米零价铁颗粒的团聚现象, 提高其在水体富营养化治理中的长期稳定性和效果。
- 2) 易被氧化: nZVI 暴露在空气中或者水中容易被氧化, 在表面形成一层氧化物从而影响 nZVI 与污染物进行接触反应[11]。这种氧化过程会导致纳米零价铁的活性降低, 从而影响其在水体中的去除效果。因此, 需要采取有效的措施, 如表面修饰、包覆保护等, 延缓纳米零价铁的氧化过程, 提高其长期稳定性。
- 3) 毒性的潜在风险: 纳米零价铁颗粒可能对水生生物产生一定的毒性影响, 当纳米零价铁颗粒进入水体中时, 它们可能与水生生物发生接触, 这些颗粒可能与生物体的细胞结构和代谢通路发生相互作用, 导致细胞损伤、氧化应激和代谢紊乱等不良效应, 进而影响其生理过程和生态系统的稳定性。鉴于这些潜在的风险, 需要进行更深入的生物毒理学研究, 以评估纳米零价铁对水生生物的实际影响和生态风险。通过这些研究, 可以更全面地了解纳米零价铁在水体生态系统中的影响, 为其安全应用提供科学依据和技术支持。

### 4. 纳米零价铁的未来展望和发展趋势

#### 1) 优化纳米零价铁的制备方法

随着纳米技术的不断发展, 纳米零价铁的制备方法也在不断优化。未来的研究可以进一步探索新的制备工艺和材料结构设计, 以提高纳米零价铁的制备效率、成本效益和稳定性。例如, 可以研究开发更环保、高效的制备方法, 如绿色合成法、微生物合成法等, 同时结合表面修饰和功能化技术, 实现纳米零价铁材料的多功能化应用。

#### 2) 深入探究其在不同水体环境中的适用性

纳米零价铁在不同水体环境中的适用性可能存在差异, 受到水体成分、pH 值、温度等因素的影响。未来的研究可以深入探究纳米零价铁在不同水体环境中的去除效果和影响机制, 分析其适用性和局限性, 为其在实际应用中的精准治理提供科学依据。

### 3) 探索纳米零价铁与其他治理技术的结合应用

纳米零价铁与其他治理技术的结合应用是未来的研究重点之一。可以将纳米零价铁与生物修复、微生物修复、植物修复等传统治理技术相结合, 形成多元化、综合化的治理方案, 提高水体富营养化治理的效果和可持续性发展。此外, 还可以探索纳米零价铁与先进的材料技术、生物技术和智能监测技术的结合应用, 实现水体治理的智能化、高效化和可持续发展。

## 5. 结论

1) 纳米零价铁在水体富营养化治理中的应用前景 纳米零价铁作为一种新兴的环境治理材料, 展现出了广阔的应用前景和巨大的发展潜力。在水体富营养化治理中, 纳米零价铁通过吸附、还原和沉淀等多重机制, 有效去除水体中的营养物质, 从而显著提升水体生态环境质量, 其应用不仅为水环境保护提供了有力保障, 还为实现可持续发展注入了新的动力。

### 2) 纳米零价铁应用中面临的挑战

虽然纳米零价铁在水体富营养化治理中展现出巨大的潜力, 但其实际应用仍面临着诸多挑战。包括制备成本高、长期稳定性的不确定性以及潜在的生态风险等问题, 亟需在未来的研究中得到解决。现有的研究主要集中在材料的基础性能及其在实验室条件下的应用效果, 当前需要进一步加强研究和技术创新, 不断优化材料性能和治理效果, 以应对实际应用中的复杂环境。

### 3) 未来研究方向

纳米零价铁在水体富营养化治理中的研究将集中于以下几个方面: 首先, 优化制备方法以降低成本并提升材料性能; 其次, 深入探讨其在不同水体环境中的适用性, 以确保广泛的应用效果; 最后, 探索与其他治理技术的结合应用, 发挥协同效应, 进一步提升治理效率。这些研究方向的推进, 将有助于实现纳米零价铁在水体富营养化治理中的高效、可持续应用。与已有研究相比, 未来的工作应更加注重材料的实用性和多样性, 通过跨学科的合作和技术整合, 推动纳米零价铁在水体富营养化治理中的高效、可持续应用。

## 基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2320609); 重庆市科技局面上项目(CSTB2022NSCQMSX1145)。

## 参考文献

- [1] 刘有华, 王思婷, 杨乔乔, 等. 国内外水体富营养化现状及聚磷菌研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 26-35.
- [2] 于业帆. 改性生物炭材料的制备及其在水体富营养化治理中的应用[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [3] 喻航. 水体富营养化的危害及防治对策[J]. 智能城市, 2019, 5(17): 147-148.
- [4] 葛秋. 河道富营养化治理措施分析[J]. 水利技术监督, 2024(6): 58-60, 67.
- [5] 张茜茜, 夏雪芬, 周文, 等. 纳米零价铁的制备及其在环境中的应用进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 60-65.
- [6] 王鹏, 王义东, 柳听义. 球磨法制备纳米零价铁的研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(9): 2924-2933.
- [7] 阚连宝, 刘泽. 纳米零价铁制备与应用的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 215-223.
- [8] 潘柯辛, 唐仁士, 蔡晓阳, 等. 零价纳米铁的制备与应用[J]. 绿色科技, 2019(8): 159-161, 218.
- [9] 吴栋, 韦建军, 唐永建, 等. 纳米铁粉制备方法的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008(2): 352-356.
- [10] 薛浩. 污泥生物炭负载纳米零价铁去除水中重金属离子的研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2024.
- [11] 刘贞鑫, 柯玥, 黄磊, 等. 纳米零价铁改性及其应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(12): 253-259.