

# 基于电动修复技术的农田重金属镍污染治理

张铎玉<sup>1</sup> 高宇<sup>1\*</sup> 陈逸恒<sup>1</sup> 刘泽<sup>1</sup> 胡瑶函<sup>2</sup>

1 沈阳工业大学环境与化学工程学院 2 中国石化辽阳分公司

DOI:10.12238/eep.v7i7.2172

**[摘要]** 本文主要介绍了电动修复法在去除土壤中镍元素方面的研究成果。文章通过实验设计和结果分析,验证了电动修复法的有效性和环境友好性,展示了其在土壤修复领域的广泛应用前景。此外,文章还评估了电动修复法对土壤环境的影响,确保其在实际应用中的可行性和效果的显著性。文章强调,电动修复法作为一种新兴的土壤修复技术,具有操作简便,适用范围广等优势。综上所述,本文全面展示了电动修复法在去除土壤中镍元素方面的研究成果和应用前景。

**[关键词]** 电动修复法; 镍元素; 环境污染修复技术

中图分类号: X501 文献标识码: A

## Treatment of heavy metal nickel pollution in farmland based on electric restoration technology

Duoyu Zhang<sup>1</sup> Yu Gao<sup>1\*</sup> Yiheng Chen<sup>1</sup> Ze Liu<sup>1</sup> Yaohan Hu<sup>2</sup>

1 School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang University of Technology

2 Sinopec Liaoyang Branch, Liaoyang

**[Abstract]** This paper mainly introduces the research results of electrokinetic remediation in removing nickel elements from soil. Through experimental design and result analysis, the effectiveness and environmental friendliness of electric restoration method were verified, and its wide application prospect in the field of soil remediation was demonstrated. In addition, the paper also evaluated the impact of electric restoration method on soil environment to ensure its feasibility and effectiveness in practical application. The paper emphasizes that as a new soil remediation technology, electric restoration method has the advantages of simple operation and wide application. In summary, the research results and application prospects of electrokinetic remediation in removing nickel from soil are presented.

**[Key words]** electric repair method; Nickel; Environmental pollution remediation technology

## 引言

电动修复法,作为新兴的土壤与水体修复技术近年来备受瞩目。该技术借助电场力,促进污染物在环境介质中的迁移、转化与清除,显著提升修复效率。其重要性不仅限于效率提升,还涵盖能源可持续、碳减排及生态改善等多维度。针对日益严峻的镍污染问题,源于工业排放,危害生态健康及人体安全,需强化源头防控与废水治理。电动修复法历经实验室至实际应用的发展机遇,有效应对土壤重金属污染,环境效益显著。然而,能耗与电极材料瓶颈待解,需通过研发高效电极及优化电流参数等策略加以克服。

## 1 电动修复法基本原理

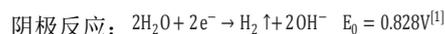
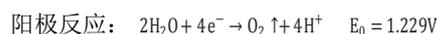
### 1.1 电动修复法概述

电动修复法是一种利用电场作用来加速污染物在土壤或水体中迁移、转化和去除的环境修复技术。通过在受污染区域埋设电极并施加直流电场,污染物在电场的作用下发生定向迁移,

从而被去除或转化。

### 1.2 电动修复法中的电化学反应

电动修复技术是对污染土壤插入电极通直流电压,金属离子因此作电动迁移、电渗透、电泳等运动聚集在电极附近而从溶液中导出,再对其进行集中处理,从而达到修复重金属污染土壤目的的一种技术。电动力学过程中最主要的电极反应如下:



电动修复法修复含Ni土壤中,在电极液中加入EDTA、乳酸、柠檬酸和硝酸作为加强剂,结果发现,在阴极加入柠檬酸时对土壤中Ni的去除率为53.3%,加入乳酸时对土壤中Ni的去除率约为50%,加入EDTA和硝酸时对Ni的去除率较低,分别约为30%和20%。对砂质Ni污染土壤进行了电动修复,在阴极加入乙酸、EDTA、柠檬酸都能提高Ni的移动性,完全移到电极位置的Ni分别占土壤

总Ni的6%、9%和46%,在阳极加入NaOH,同时在阴极加入乙酸时,电极处Ni含量占土壤总Ni最高达到了73%,极大提高了砂质土壤修复效率<sup>[2]</sup>。

### 1.3 电动修复法的优势与挑战

电动修复法作为一种创新的土壤及地下水污染治理技术,利用电场的力量来加速污染物的定向迁移。在电场的作用下,土壤中的带电离子或极性分子会受到定向电力的作用而发生移动,这一物理过程显著提升了污染物从污染源向处理区域迁移的速度,相较于传统的物理、化学或生物修复方法,其修复过程更为迅速,效率实现了质的飞跃。电动修复法在操作过程中避免了大量使用化学药剂,这不仅减少了因化学药剂残留而可能引发的二次污染风险,也顺应了当前环境保护和可持续发展的时代潮流。相比于依赖大量化学药剂的传统修复手段,电动修复法以清洁的电能作为核心动力源,显著降低了能源消耗,减少了温室气体排放和其他环境负担是名副其实的绿色修复技术。任何技术的推广与应用都不是毫无限制的。电动修复法虽然高效快捷,但其技术门槛较高,直接导致了设备购置、安装调试以及后期运行维护等环节的成本相对昂贵。这一现状使得在经济欠发达地区或预算有限的环境治理项目中,电动修复法的普及应用面临挑战。此外,土壤的物理化学性质也是影响电动修复效果的关键因素之一。对于导电性差的土壤,电场的建立与维持较为困难,导致污染物迁移效率降低;而在面对某些特定类型的污染物或复杂的土壤结构时,污染物的迁移路径可能受到阻碍,进一步增加了修复的难度和成本<sup>[3]</sup>。

## 2 电动修复法在镍元素修复中的应用

### 2.1 镍元素污染土壤的特点

镍元素污染土壤的特点主要体现在以下几个方面:来源广泛:镍污染的土壤来源既可能来自自然污染源,如超基性岩体蛇纹岩的风化释放,也可能来自工业污染源,如矿冶、电镀行业排放的废水、废气及废渣等。富集性强:镍可以在土壤中富集,含镍的大气颗粒物沉降、含镍废水灌溉、动植物残体腐烂、岩石风化等都是土壤中镍的来源。部分土壤中的镍含量甚至可达0.1%~0.7%,具有潜在的环境风险。难以降解:进入土壤中的镍元素不易被降解,而是会在土壤中累积,对土壤生态系统产生长期影响。影响农作物:镍污染的土壤会影响农作物的生长和产量,部分农作物甚至无法在此类土壤中生存。此外,农作物还可能吸收并积累土壤中的镍,从而对人类健康产生潜在威胁。综上所述,镍元素污染土壤的特点主要体现为其广泛的来源、强的富集性、难以降解性以及其对农作物和人体健康的潜在危害<sup>[4]</sup>。

### 2.2 电动修复法修复镍元素的实验研究

电动修复法修复镍元素的机理主要包括电迁移和电渗流两个方面。电迁移是指在电场作用下,金属离子在电解质溶液中发生定向移动,从而被电极吸附或去除。电渗流则是通过电场作用使得土壤或水体中的水分发生流动,从而带动污染物的迁移。在镍污染的修复过程中,电动修复法能够有效地将镍离子从污染介质中分离出来,降低其环境风险<sup>[5]</sup>。在电动修复过程中,镍元

素的行为受到多种因素的影响,如电场强度、电解质溶液浓度、pH值等。研究表明,适当的电场强度和电解质溶液浓度能够促进镍离子的电迁移和电渗流,提高修复效率。同时,pH值的变化也会影响镍离子的存在形态和迁移行为,因此在电动修复过程中需要合理控制pH值<sup>[6]</sup>。

### 2.3 镍元素在电动修复过程中的迁移转化机制

在电动修复过程中,镍离子的迁移主要受到电场的作用。当施加电场后,土壤或水体中的镍离子会在电场力的作用下发生定向迁移。镍离子会由阳极区域向阴极区域移动,这是由于在电场作用下,阳极区域的正电荷吸引镍离子,而阴极区域的负电荷排斥镍离子。这种迁移行为使得镍离子能够被集中在某一特定区域,便于后续的去和处理。在迁移的过程中,镍离子还可能发生一系列的化学转化。例如,当镍离子遇到带有相反电荷的胶体颗粒或离子时,可能发生吸附、沉淀或络合等反应。这些反应改变了镍离子的存在形态,可能使其从溶解态转变为固态或络合态,从而降低了其迁移能力和环境风险<sup>[7]</sup>。

## 3 实验结果与讨论

实验结果显示,在电场作用下,土壤中镍元素的含量随时间逐渐降低。不同电场强度和电解液浓度条件下,镍元素的去除率存在差异。适当提高电场强度和电解液浓度有助于提高镍元素的去除率。电动修复法修复镍元素污染土壤的机制主要包括电迁移和电渗析作用。在电场作用下,土壤中的镍离子发生迁移,通过电解液中阴离子的携带作用,向阳极方向移动并最终被去除。同时,电渗析作用有助于改善土壤的渗透性,促进镍离子的迁移和去除<sup>[8]</sup>。电场强度、电解液浓度、土壤性质等因素对电动修复法修复镍元素污染土壤的效果具有重要影响。适当提高电场强度和电解液浓度有助于提高镍元素的去除率。然而,过高的电场强度和电解液浓度可能导致能耗增加和设备损耗等问题。此外,土壤性质如土壤颗粒大小、导电性等也会影响修复效果。

## 4 电动修复法修复镍元素的效果评估

### 4.1 影响电动修复效果的因素分析

不同类型的土壤成分、结构以及理化性质不同,这些因素共同作用于镍离子的吸附过程,导致其对镍离子的亲和力各不相同。具体来说,土壤的粘粒含量、矿物组成以及有机质的存在状态都会显著影响镍离子的吸附效率和机制,进而影响镍离子在土壤中的迁移路径和转化形式。土壤或沉积物的颗粒大小是另一个关键因素,直接关联到土壤的渗透性能。细粒土壤拥有更小的孔隙结构,限制了水分和溶质的通过,从而减缓了镍离子的扩散速度。相反,粗粒土壤因其较大的孔隙空间,促进了流体的快速渗透,加速了镍离子的迁移。离子交换能力则是土壤吸附和解吸镍离子能力的重要体现。土壤中富含的阳离子交换位点,如粘土矿物和有机质的表面,能够与镍离子发生交换反应,这种能力决定了镍离子的暂时存储量,还影响了其后续的释放和迁移行为。溶液的pH值是一个关键的环境参数,它直接影响镍离子的存在形态和溶解度,进而影响其在土壤中的迁移和转化效率。过高

或过低的pH值都可能促进镍离子的沉淀或抑制其溶解, 改变其迁移路径。电解质浓度通过改变溶液的离子强度和电导率, 对镍离子的迁移产生间接影响。高电解质浓度可能会增加溶液的离子阻力, 降低镍离子的扩散速度<sup>[9]</sup>。在土壤环境中, 其他共存离子可能与镍离子发生复杂的竞争吸附、沉淀或络合反应, 这些相互作用进一步调制了镍离子的迁移路径和转化机制。温度变化能够显著改变镍离子在土壤中的迁移和转化速率, 使得在不同季节或气候条件下, 镍离子的环境行为表现出显著差异。

#### 4.2 优化策略与实践建议

优化电解液配方, 增强镍离子的溶解与迁移能力, 提升修复效率。精细调控电流密度确保镍离子被有效去除。创新电极材料, 增强其对镍离子的吸附容量与选择性, 加速修复进程。全面评估环境影响, 采用环保材料与技术, 确保修复过程安全无害。优化电流与电压参数, 提升整体修复效率与稳定性。实施定期监测, 确保修复效果符合预期, 及时调整策略。同时, 综合考虑经济成本, 探索高性价比的修复方案, 实现环境效益与经济效益的双赢。

#### 5 结论

电动修复法, 作为一种针对土壤镍元素污染的高效解决方案, 凭借其独特的优势在环境治理领域崭露头角。不仅在技术上实现了对镍元素污染土壤的有效修复, 还以其操作简便、成本低廉以及显著的环保特性, 赢得了广泛的关注与认可。电动修复法通过简单的电场设置即可启动污染物迁移的过程, 无需复杂的预处理步骤或高端的技术设备, 这使得现场操作人员能够快速上手, 降低了对专业技术的依赖度。相较于其他可能涉及大量化学试剂或高能耗的修复方法, 电动修复法的成本更为低廉, 尤其对于大规模污染场地的治理而言, 这一优势尤为明显, 有助于缓解环境治理的资金压力。电能作为清洁能源的应用, 也符合当前节能减排、绿色低碳的发展趋势, 为实现环境保护和可持续发展目标贡献了力量。未来的研究应着重于进一步优化其操作条件, 包括电场强度、电流密度、电极材料等关键参数的精准调控, 以期提高处理效率, 缩短修复周期。同时还应积极探索电动修复法与其他先进技术的联合应用, 如与生物修复、化学稳定化等方法相结合, 形成优势互补的综合治理体系, 以应对更为复杂多变的土壤污染问题。扩大电动修复法的应用范围也是未来研究的

重要方向之一。目前, 电动修复法在处理特定类型污染物和土壤条件方面已取得了一定成果但仍有大量未知领域等待探索。通过深入研究不同土壤类型、污染物种类及浓度对电动修复效果的影响机制, 可以为其在更广泛领域的应用提供科学依据和技术支持。电动修复法作为一种有效的处理土壤镍元素的方法, 其发展前景广阔。未来通过不断优化和完善技术体系, 电动修复法必将在环境保护和可持续发展领域发挥更加重要的作用。

#### [参考文献]

- [1]王丙烁, 黄益宗, 农, 等. 镍污染土壤修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2392-2402.
- [2]李敏, 陈洪岳, 孙照明. 电动联合法对复合重金属污染底泥的修复[J]. 环境工程学报, 2021, 15(05): 1652-1661.
- [3]关卉, 王金生. 雷州半岛农业土壤与作物镍含量及其潜在健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1411-1416.
- [4]刘春早, 黄益宗, 雷鸣, 等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 260-265.
- [5]Bolormaa O, Jajinjav Y, Ochirkhuyag B. Removal of Cu, Mo and As from Contaminated Industrial Soil by Electrokinetic Remediation[J]. Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 13(1): 1-8.
- [6]杨科壁. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究[J]. 世界农业, 2007(8): 58-61.
- [7]吴永红, 靳少非. 基于CiteSpace的重金属污染土壤修复研究文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 454-461.
- [8]景延秋, 袁秀秀, 王宇辰, 等. 农田土壤重金属污染及防治对策[J]. 湖南农业科学, 2016(3): 42-45.
- [9]郑君健, 刘杰, 张学洪, 等. 重金属污染土壤植物修复及强化措施研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18): 159-164.

#### 作者简介:

张铎玉(2003--), 男, 汉族, 山西省晋城市人, 本科在读, 环境工程专业。

#### 通讯作者:

高宇(1979--), 男, 汉族, 辽宁省营口市人, 工学博士, 职称: 教授, 职务: 所长, 研究方向: 碳达峰减污节能, 土壤污染控制。