

人工湿地深度净化再生水的效能与可持续性探讨

高玉蒲

沈阳水务集团有限公司

摘要：随着全球水资源稀缺和水污染问题的加剧，再生水资源的有效开发成为当务之急。人工湿地技术作为一种生态友好的水质净化处理方法，在深度净化再生水方面表现出巨大潜力。然而，尽管其机理和效能已经得到广泛研究，但在实现可持续性方面仍面临一些挑战。本文提出了一系列策略，包括优化湿地设计与植物配置、强化湿地生态系统、加强管理与监测。这些策略旨在提高人工湿地的效能和可持续性，为解决水资源问题、改善水质环境和促进生态保护做出贡献。通过实施这些策略，我们可以更好地利用人工湿地技术，确保再生水资源的可持续供应，从而满足不断增长的水资源需求。

关键词：人工湿地；再生水；效能分析；可持续性；污染物去除；生态系统；资源可持续性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.09.118

引言

随着城市化和工业化的不断发展，水资源短缺和水体污染问题日益加剧，迫使我们寻求创新的水资源管理和水质治理方法。在这一背景下，再生水资源的开发和利用备受关注，成为解决水资源紧缺和保护生态环境的关键途径之一。人工湿地技术作为一种基于自然生态原理的水质净化处理方法，近年来备受研究和实践的青睐。它不仅能够有效地净化水质，还能提供可再生的再生水资源，具备较好的生态可持续性和资源可持续性。在城市和工业区域，人工湿地已经被广泛应用于废水处理和水质修复，取得了令人瞩目的成效。因此，研究人工湿地深度净化再生水的效能和可持续性，对于解决当今水资源和水质问题具有重要意义。

一、人工湿地深度净化再生水的效能分析

（一）溶解性有机质（DOM）降解机理与效能

溶解性有机质（DOM）是水体中的复杂有机化合物，通常由藻类、细菌、植物残渣以及有机废物等多种因素贡献。DOM的存在对水体的水质和生态健康产生了深远影响，因此人工湿地作为一种有效的水体净化技术，对于降解DOM的机理与效能至关重要。人工湿地通过生物过程，主要包括湿地植物和微生物的协同作用，来降解DOM。湿地植物通过根系吸收DOM中的营养物质，这一过程被称为吸收。随后，微生物在湿地中繁殖和代谢，将DOM分解成更简单的有机物质，这包括各种酶解和氧化还原反应。最终，这些分解产物可能会进一步被

吸附到湿地介质上或被微生物吸收，最终转化为植物可吸收的无机物质或微生物细胞成分。在这个过程中，湿地植物的根系提供了降解DOM所需的适宜环境，同时还吸收了部分DOM中的营养物质，减少了水体中的有机负荷。湿地微生物通过各种酶的作用，将DOM降解成更简单的有机物，进一步降低了水体中的DOM浓度。人工湿地的效能在降解DOM方面具有显著优势。通过湿地的生物过程，DOM的降解效率得以显著提高，从而减少了水体中的有机物含量。这不仅有助于改善水质，减轻了富营养化和水体污染的风险，还提高了水体的透明度，促进了水体的自净能力。

（二）强化脱氮机理与效能分析

脱氮机理主要包括硝化和反硝化过程，这些过程是由湿地内生活的微生物群体所主导的。在硝化过程中，氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）被氧化为亚硝酸盐氮（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ），然后进一步氧化为硝酸盐氮（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）。这个过程需要氧气的存在，因此湿地内的氧气浓度是影响硝化效率的关键因素。湿地植物的根系提供了氧气，并且在根系附近的微生物群体中促进了硝化反应。反硝化过程则发生在湿地中的低氧或无氧环境中，它将硝酸盐氮还原为氮气（ N_2 ）或一氧化氮（ NO ）。这个过程有助于氮的彻底去除，避免氮物质排放到水体中。湿地的微生物群体在这个过程中发挥了关键作用。湿地植物也参与了脱氮过程。植物的根系不仅提供氧气，还吸收了一部分氮物质。这种植物吸收氮的作用，尤其是对氨氮和亚硝酸盐氮的吸收，进一步增强了脱氮效果。人工湿地在脱氮方面表现出卓越的效能。通过合理设计湿地植物种类和介质配比，可以显著提高脱氮效率。选择适应性强、氮吸收能力高的湿地植物有助于最大限度地降低氮物质的浓度。湿地的生态系统在提供合适的氧气浓度和营养条件方面具有自净能力，也有助于优化脱氮效能。

（三）强化除磷机理与效能分析

人工湿地通过多种机制实现磷的去除，包括植物的吸收、介质的吸附和微生物的同化作用。湿地植物的根系能够吸收水中的磷，并将其转化为植物组织中的无机磷，这一过程被称为植物吸收。随着湿地植物生长和繁殖，其中的磷被固定在植物体内，从而将磷从水体中移除。介质表面具有吸附磷的能力，当水流经过湿地介质时，其中的磷会被介质表面吸附，从而减少了水体中的磷浓度。这种吸附作用对于去除磷酸盐和溶解性磷特别有效。微生物通过同化作用将水中的磷转化为它们自身

的细胞成分，从而将磷从水体中去除。人工湿地对于磷的去除效果非常显著，特别是对于总磷和磷酸盐的去除效果尤为突出。这主要归功于湿地内多种机制的协同作用。通过选择适应当地环境的湿地植物和合适的介质材料，可以进一步优化除磷效能。合适的湿地植物种类可以提高植物吸收磷的效率，而优化的介质可以增强吸附磷的能力。

（四）余氯控制机理与效能

人工湿地技术通过生物降解和物理吸附等多重机制，成功去除余氯，为再生水的回用提供了可行的解决方案。湿地内生活着各种微生物群体，其中一些微生物能够代谢氯化物，将余氯还原为无害的氯化物离子。这个过程主要发生在湿地的有机质介质上，微生物通过降解有机质产生的有机物质来提供所需的电子和氢离子，从而实现余氯的还原。这种生物降解过程对于去除余氯非常有效。湿地介质表面通常具有高度吸附能力，能够吸附余氯分子，将其固定在介质表面。这种吸附过程可迅速去除余氯，确保再生水中的氯浓度降至安全水平。介质的吸附效能与介质种类和湿地运行参数有关，可以通过优化湿地设计和运行管理来提高吸附效率。人工湿地对于余氯的去除效能稳定可靠，确保再生水的水质安全。通过合理调整湿地的运行参数和介质配比，可以进一步提高余氯的去除效率，确保符合水质标准。余氯的去除也有助于保护湿地生态系统中的生物多样性，因为高浓度的余氯对湿地生物可能产生毒害作用。同时，去除余氯也有助于提高水体的自净能力，从而更好地维护湿地的生态平衡。

二、人工湿地深度净化再生水的可持续性

（一）生态可持续性

传统的污水深度处理过程中常常需要大量的化学药剂来去除污染物，然而，这些药剂本身可能对水体和环境产生负面影响，并可能导致二次污染问题。相比之下，人工湿地利用自然生态系统的生物和生物化学过程来去除污染物，减少了对化学药剂的依赖，从而减少了二次污染的风险，确保了水质净化过程的可持续性。湿地是生物多样性的重要栖息地，它们提供了多种生态位和丰富的食物链，容纳了众多的植物、昆虫、鸟类和其他野生动物。人工湿地的建设和维护通常会考虑到这些生物的生存需求，因此有助于保护和维护当地的生物多样性。湿地的建设还有助于生态系统的恢复，因为它们可以提供适宜的生态环境，帮助修复受损的生态系统。随着城市化和工业化的加剧，水资源短缺和水质问题日益严重。人工湿地通过去除污染物、改善水质，为城市和农村地区提供了可持续的水资源管理方法。通过净化再生水，人工湿地技术可以提供可再生的水资源，减轻了对自然水体的依赖，有助于维护水资源的可持续供

应。人工湿地技术在社会层面也具有生态可持续性。它能够改善居民生活环境，提高公众环保意识，促进社区参与和合作。湿地常常成为休闲和娱乐的场所，有助于提高居民的生活质量，增强社区凝聚力。湿地还可以创造经济价值，如生态旅游、湿地农业等，从而为社会提供可持续的经济收益。

（二）资源可持续性

湿地植物在净化过程中发挥着至关重要的作用，它们的根系吸收污染物，同时提供氧气，促进微生物的生长和活性。这些湿地植物种类多样，适应性强，可以根据不同水体和环境的特点进行选择。这些植物是可再生资源，其生长和繁殖不需要大量的外部能源或原材料，因此可以持续利用。微生物群体在湿地的生态系统中起到了媒介作用，它们参与了污染物的降解和转化过程。湿地内的微生物通常具有较高的生物多样性，不同类型的微生物群体可以处理不同类型的污染物。这些微生物的自然存在和生长是可再生的，湿地的运行和管理通常不需要额外的资源投入。湿地介质通常由天然材料组成，如沙子、砾石、植物秸秆等。这些材料在湿地中具有高度的吸附能力，有助于去除污染物。它们不仅可以净化水体，还可以在湿地内逐渐沉积和累积，不需要频繁更换或补充。因此，湿地介质也是可再生的资源。人工湿地技术还可以实现水资源的循环利用，进一步提高资源的可持续性。通过净化再生水，可以将水资源回收和再利用，减轻对自然水体的依赖。这有助于缓解水资源短缺问题，提高水资源的可持续供应。

（三）社会可持续性

人工湿地通常被设计成自然景观，它们可以容纳众多的植物和野生动物，提供了休闲和娱乐的场所，改善了周边社区的居住环境。湿地通常被设计成开放式的生态系统，吸引了许多市民前来参观和了解湿地生态。这种亲近自然的体验有助于提高公众对生态环境保护的认识和重视程度。公众通过亲身感受湿地的美丽和生态功能，更容易理解水资源管理的重要性，积极支持环保措施的实施。湿地的建设和维护通常需要社区的积极参与，包括志愿者的参与、居民的支持和当地政府的合作。社区成员可以参与湿地的植树造林、水质监测、生态修复等活动，从而建立了与湿地保护相关的社区网络和组织。这种参与和合作有助于形成社区共识，推动湿地的可持续管理和保护。人工湿地技术还可以创造经济价值，促进社会的可持续发展。湿地通常吸引了生态旅游、生态农业等相关产业的发展，为社区创造了就业机会和经济效益。湿地也可以成为教育和科研的重要场所，为教育和科研机构提供了研究和培训的资源。这些经济和教育价值的创造有助于社区的可持续发展。

三、加强人工湿地深度净化再生水的效能与可持续

性路径

（一）优化湿地设计与植物配置

优化湿地设计与植物配置可以进一步提高湿地的净化效能，减少资源投入，以及增强湿地的生态稳定性。湿地布局应考虑水流均匀分布，确保原水均匀流经整个湿地系统。这有助于最大限度地利用湿地内的生态过程，提高污染物的去除效率。湿地的水流路径和流速应得到合理控制，以确保原水在湿地内停留足够的时间，充分接触和交互作用，从而实现更高效的净化。湿地植物在水体净化中发挥着重要的角色，它们通过根系吸附、吸收和降解污染物，促进微生物的活性，提高水体的净化能力。为了优化湿地的效能，应选择适应当地环境条件的湿地植物。这些植物应具有快速生长和较高的净化能力。例如，芦苇和香蒲等湿地植物通常被认为是优秀的选择，它们的根系能够吸附大量污染物，同时促进硝化和反硝化等有益生物过程。湿地植物的配置也需要考虑湿地内的空间布局。在湿地系统中，可以设置不同类型的湿地植物区域，以应对不同污染物的处理需求。例如，设置硝化区和反硝化区，有助于优化氮的去除效能。湿地植物的密度和分布也应根据实际情况进行调整，以确保最佳的生态效果。湿地设计与植物配置的优化旨在实现更高效的水体净化，同时降低运行维护成本。这不仅有助于提高湿地的经济可持续性，还有助于降低资源投入，减少对外部能源和原材料的依赖。同时，优化的湿地设计和植物配置还可以提高湿地的生态稳定性，促进湿地的生物多样性保护和生态系统的恢复。

（二）强化湿地生态系统的稳定性与恢复力

强化湿地生态系统的稳定性与恢复力可以加强湿地的抗干扰能力，提高生态系统的健康和稳定性，从而实现更可持续的水资源管理和环境保护。生物多样性是湿地生态系统的重要特征，它有助于提高湿地对不同环境压力的适应能力。引入多样性的湿地植物、微生物和野生动物群体可以增加湿地的生态复杂性，提供不同的生态功能和服务。例如，各种湿地植物可以在根系和叶片上附着微生物，形成复杂的生态网络，促进污染物的降解和水质的净化。野生动物也可以在湿地内寻找食物和栖息地，促进湿地的自然调控和生态平衡。湿地生态系统受到自然和人为因素的影响，包括气候变化、污染、水位波动等。因此，湿地需要定期的维护和管理，以确保其长期稳定运行。生态修复包括修复受损湿地、恢复植被、增加栖息地等措施，以提高湿地的生态功能。维护工作涉及清理堵塞的水流通道、监测水质、控制有害生物等。这些工作有助于减轻湿地生态系统受到的压力，保持其健康和活力。

（三）加强湿地运行管理与监测评估

加强湿地运行管理与监测评估可以有效管理湿地的运行，及时发现和解决问题，确保湿地的净化效果稳定性和持续性。湿地运行管理制度应包括运行计划、维护计划、应急响应计划等方面的内容。运行计划应明确湿地的运行目标、流程和责任分工，确保湿地按照设计要求运行。维护计划应规定湿地设备和设施的维护周期和方法，以保障其正常运行。应急响应计划应包括应对突发事件和问题的措施，以降低潜在风险。湿地的净化效果受到许多因素的影响，包括水质、水量、温度等。因此，实时监测这些关键指标可以帮助湿地运营者及时了解湿地的运行状况，发现潜在问题。监测数据还可以用于评估湿地的净化效果，是否达到了设计要求。如果出现问题，可以迅速采取措施加以修复和改进，确保湿地的稳定性和效能。加强湿地运行管理与监测评估的实施不仅有助于提高湿地的效能，还有助于降低运行维护成本。及时发现和解决问题可以防止问题进一步扩大，降低修复成本。监测和评估数据可以用于改进湿地的设计和运行策略，提高湿地的效能和可持续性。

结束语

在研究人工湿地深度净化再生水的效能与可持续性之后，我们不仅深刻理解了这一技术在解决水资源和水质问题中的重要作用，也提出了一系列可行的策略来提高其效能和可持续性。然而，这仅仅是一个开始。未来，我们需要进一步深化研究，持续优化人工湿地设计、管理和监测方法，以适应不同地域和水质条件的需求。同时，技术创新也是推动人工湿地技术不断发展的关键，我们应该鼓励和支持更多的科研和实践项目，以开发更高效、更环保的湿地净化技术。

参考文献

- [1] 吴祥慈, 王函, 赵瑞等. 表面流人工湿地净化微污染水体[J]. 清洗世界, 2023, 39(12): 130-132.
- [2] 忻飞, 邵一奇, 尹树捷等. 银川市再生水人工湿地生态修复工程[J]. 湿地科学与管理, 2023, 19(06): 49-53.
- [3] 李檬, 郑华清, 刘嘉恒等. 人工湿地深度净化再生水的效能与可持续性探讨[J]. 广东化工, 2023, 50(11): 151-152+167.
- [4] 李檬, 刘嘉恒, 郑华清等. 人工湿地深度净化对再生水CDOM的控制效果研究[J]. 广东化工, 2022, 49(24): 147-150+195.
- [5] 王文明, 危建新, 尹振文等. 洋湖人工湿地再生水深度净化工程设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(04): 59-62.