

基质类型对人工湿地影响的研究

Jiajia Yuan*, Tianhao Liu, Yifan Zhuang

School of Materials and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen, Guangdong

【摘要】本研究通过批量试验评估了沸石、陶粒、石英砂、活性炭作为人工湿地基质的污染物去除效果。经过 12 天的处理，沸石、陶粒、石英砂、活性炭对浮游藻类的浊度、表面颜色、本色和叶绿素的去除率 4~8 毫米陶粒除垢率分别达到 93.6%、92.1%、89.7%、91.3%，明显改善了景观水体的感官效果，TN 达到地表水 IV 类标准，TP、高锰酸盐指数满足地表水水质为 III 类。经陶粒处理后，景观水体的 UV₂₅₄ 和 UV₂₈₀ 值以及 CDOM 吸收系数均显著降低，E₂₅₀/E₃₆₅ 值明显高于其他基质，表现出良好的污染物去除效果。结果表明，4~8 mm 陶粒 是适合用于封闭式景观水体的 CW 处理工艺的基质，未来应开展长期试验以检验其污染物去除效果。

【关键词】小型景观封闭水体；基质类型；污染物去除

【基金项目】深圳职业技术学院校级科技青年创新项目（6022310026K）；深圳职业技术学院科研项目（6022312024K）

【收稿日期】2025 年 3 月 15 日

【出刊日期】2025 年 4 月 15 日

【DOI】10.12208/j.wrrm.20250004

The Research on the Effects of Substrate Types Using for Constructed Wetland

Jiajia Yuan*, Tianhao Liu, Yifan Zhuang

School of Materials and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen, Guangdong

【Abstract】In this study, pollutant removal effects of zeolite, ceramsite, quartz sand, and activated carbon were assessed its feasibility as a constructed wetland substrate using batch experiments. After 12 days of treatment, the removal rates of turbidity, surface color, true color, and chlorophyll of planktonic algae by 4~8 mm ceramic granules reached 93.6%, 92.1%, 89.7%, and 91.3%, respectively, which significantly improved the sensory effect of the landscape water. TN reached the class IV of the surface water, meanwhile, TP and permanganate index fulfilled the quality of the surface water class III. After being treated by ceramsites, the UV₂₅₄ and UV₂₈₀ values, as well as CDOM absorption coefficients of the landscape water, were much lower, and the values of E₂₅₀/E₃₆₅ were clearly higher than other substrates, which demonstrated excellent contaminant removal effect. All results indicated that 4~8 mm ceramsites were suitable substrates when used in CWs treating closed landscape water bodies. Long-term experiments should be carried out to test its pollutants removal performance in the future.

【Keywords】Small landscape closed water; Substrates type; Pollutants removal

1 简介

人工湿地充分利用低成本、高效的基质发挥其截留吸附功能，与植物吸收、微生物降解相结合，协同处理污染物废水^[1]，该技术已应用于雨水、河湖水质净化、农村生活污水净化、污水处理厂出水深度处理等领域。基质是人工湿地的主要组成部分之一，起到吸附、截留污染物的作用，为微生物提供生长

空间^[2]，基质将植物和微生物联系在一起，是植物和微生物充分发挥作用的重要基础^[3]。不同基质的理化性质存在很大差异，其中附着在基质表面的微生物种类、数量、活性、挂膜速度等也表现出很大的差异^[4]。人工湿地中常用的基质有活性炭、沸石、石英砂、陶粒、岩石等^[5]。活性炭由于比表面积大具有良好的吸附性能，广泛应用于人工湿地水处理，能有

*通讯作者：Jiajia Yuan

注：本文于 2024 年发表在 OAJRC Environmental Science 期刊 5 卷 1 期，为其授权翻译版本。

效去除臭味、溶解性有机物等微污染物。沸石是一种比表面积大、孔隙率高的含水硅酸盐矿物,具有良好的吸附、离子交换和催化作用。王等对人工湿地中使用的沸石基质进行了综述,发现沸石比表面积大、孔隙结构良好,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有较高的吸附能力^[6]。

石英砂抗压耐磨性能好,化学稳定性好,使用寿命长,在实验中表现出良好的污物捕集能力^[7]。陶粒具有吸附能力强、化学稳定性好、易再生、环境友

好、价格低廉等优点。其比表面积非常有利于微生物的生长,对营养盐和有机物均有较好的去除效果^[8]。因此,本研究针对封闭式景观水体的污染特点,研究基质类型,提高人工湿地废水处理效果。

2 材料和方法

2.1 实验用水

试验水取自深圳市某小区水塘,水塘主要补给为降雨和地表径流,无其他污染源,水质情况见表 1。

表 1 实验原水水质

指标	浊度 (NTU)	表面颜色 (度)	真彩色 (程度)	总氮 (毫克/升)	总磷 (毫克/升)	高锰酸盐指数 (mg/L)	叶绿素 a (μg/L)
价值	9.5~17.5	17~41	7~17	1.2~3.0	0.04~0.15	6.8~15.4	17.8~38.5

2.2 实验方法

选取砂石和卵石作为人工湿地的布水层和支撑层,比较粒径为 2~4mm 和 4~8mm 的沸石、陶粒、石英砂、活性炭作为功能层的去除效果。实验采用直径 140cm、高 120cm 的有机玻璃柱,上部填充 100cm 上述基质作为对比,底部填充 5cm 粒径为 16~32mm 的卵石。

实验载体用自来水清洗,除去浮灰、杂物后装入柱内。在同样的条件下,回收一定量的小型景观封闭水体水,比较待比较载体的污染物去除效果,从而选定最佳载体及粒径。装置共运行 12d,每天取样进行测定分析。

2.3 分析方法

2.3.1 基本出水水质指标

对总氮 (TN) 和总磷 (TP) 进行了分析按照标准方法^[9]中描述的方法进行。

2.4 其他有机指标

2.4.1 紫外线 $_{254}\text{UV}_{280}$ 和 $\text{E}_{250}/\text{E}_{365}$

水中有机物的芳香化程度可用 UV_{254} 和 UV_{280} 米表征,其值越大,芳香化程度越高。 $\text{E}_{250}/\text{E}_{365}$ 表示水在 250nm 与 365nm 处吸光度的比值,可以表示有机化合物的分子量和聚合度, $\text{E}_{250}/\text{E}_{365}$ 值越大,分子量越小,芳香化程度越低。水样经 0.45μm 滤膜过滤后,用紫外分光光度计 (UV2600) 测定 250nm、254nm、280nm、365nm 处的吸光度。

2.4.2 含色团溶解有机物 (CDOM) 的吸光度

水体中 CDOM 的浓度无法直接测定,只能定性

分析,通常用吸光度系数 $\alpha(\lambda)$ 来表征。水样经 0.22μm 滤膜预过滤,以超纯水为空白。使用紫外分光光度计 (UV2600),在 355nm 波长处用 1cm 石英比色皿测量吸光度 $D(\lambda)$,得到各波长的吸光度系数。根据公式 (1) 计算 355nm 的吸光度。

$$\alpha(\lambda) = 2.303 \cdot D(\lambda) / r - \alpha'(700) \cdot \lambda / 700 \quad (1)$$

$\alpha(\lambda)$ — 波长 λ (m-1) 处的校正吸收系数;
 $\alpha'(\lambda)$ — 波长 λ (m-1) 处的未校正吸收系数;
 $D(\lambda)$ — 波长 λ 处的吸光度;
 r — 光程 (m);
 λ — 波长 (nm)。

3 结果与讨论

3.1 底物类型比较

3.1.1 浊度和色度去除

地表水的浊度主要由有机、无机颗粒、浮游藻类等引起,可以直观地反映水体污染程度。从图 1 (a) 可以看出,随着处理时间的增长,各基质柱中浊度均有明显的下降趋势,且所有基质在前 6 天的去除率高于后期,随后趋于平缓。陶粒、活性炭、2~4mm 石英砂对浊度的去除效果较好,处理后水的浊度可达 2NTU 以下。

基质对悬浮物的去除主要通过截留和吸附作用,由于活性炭和陶粒的孔径和比表面积较大,吸附效果可能更强,因此对悬浮物的去除更明显;而石英砂的比表面积随着粒径的减小而增大,对污染物的截留效果也更好。

色度有表观颜色和真实颜色两种，表观颜色是悬浮物的颜色，如水中存在大量浮游藻类可以使水体呈现相应的颜色；

真实颜色是胶体物质和溶解物质的颜色，可以通过过滤悬浮物来测量。CDOM 在自然水体中广泛存在，来源和成分复杂，主要由腐殖酸、黄腐酸、氨基酸和芳香烃等溶解有机物组成，这些物质会使水体真实颜色上升。

1 (b) 可以看出，陶粒对水体表观颜色的去除效果明显优于其他基质，经陶粒处理后的水体表观颜色在运行 9d 时即可降至 5 度以下，运行 13d 后降至 2 度以下。造成表观颜色的成因既有有色溶解物，也有非溶解物，而非溶解物的存在则影响浊度。

从图 1 (b) 可以看出，陶粒对水体表观颜色的去除效果明显优于其他基质，运行 9d 时陶粒对水体表观颜色的去除效果可达 5 度以下，运行 13d 后陶粒对水体表观颜色的去除效果可达 2 度以下。造成表观颜色的成因既有有色溶解物，也有非溶解物，而非溶解物的存在则影响浊度。

由图 1 (a) 可知，陶粒与活性炭对浊度均有较好的去除效果，且差异并不明显，因此两种基质对表面颜色去除效果的差异可能由其真实颜色所决定。

图 1 (c) 表明，陶粒相对于沸石、活性炭、石英砂对真色度的去除效果更明显，出水真色度均在 2 度以下；2~4mm 和 4~8mm 两种陶粒粒径对真色度去除的处理效果对比不明显，2~4mm 石英砂和沸石对真色度的去除效果优于 4~8mm 粒径，而活性炭则

表现出相反的趋势。

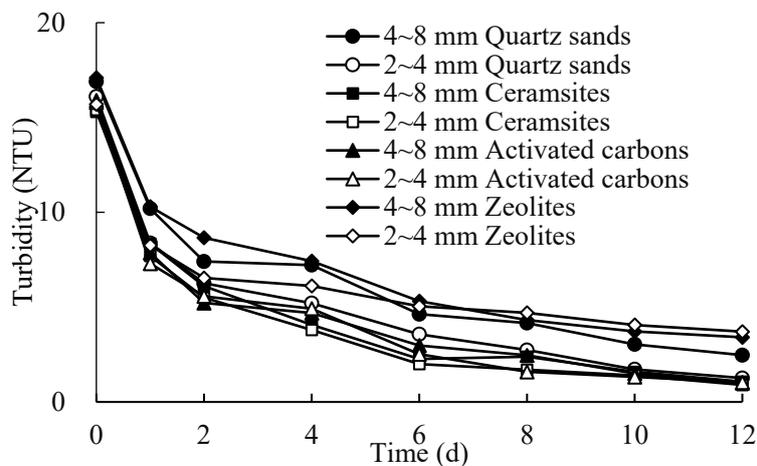
3.1.2 有机物去除

本次研究通过测试高锰酸盐指数、DOC、UV₂₅₄、UV₂₈₀ 来比较各基质对有机物的去除效果。图 2 (a) 是各基质处理后水中高锰酸盐指数的变化情况，由图可知，陶粒对高锰酸盐指数的去除效果优于其他 3 种基质，经过 12d 后降至 5.5mg/L 以下，达到了《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 的 III 类标准。

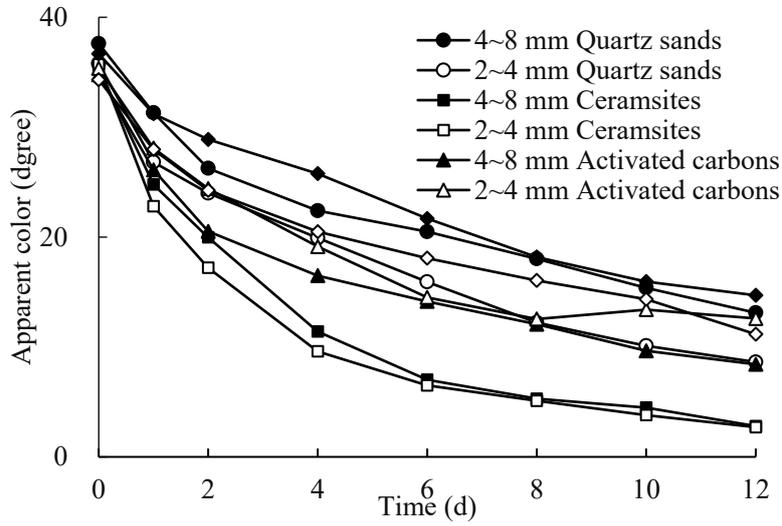
活性炭处理 12d 后将高锰酸盐指数降至 7mg/L 以下，石英砂和沸石的去除效果较差。陶粒和活性炭两种粒径对高锰酸盐指数的去除效果差别不大，而沸石和石英砂在 2~4mm 粒径的处理效果明显优于 4~8mm 粒径。

图 2 (a) 揭示了不同基质对 DOC 的去除效果，其变化规律与高锰酸盐指数一致。

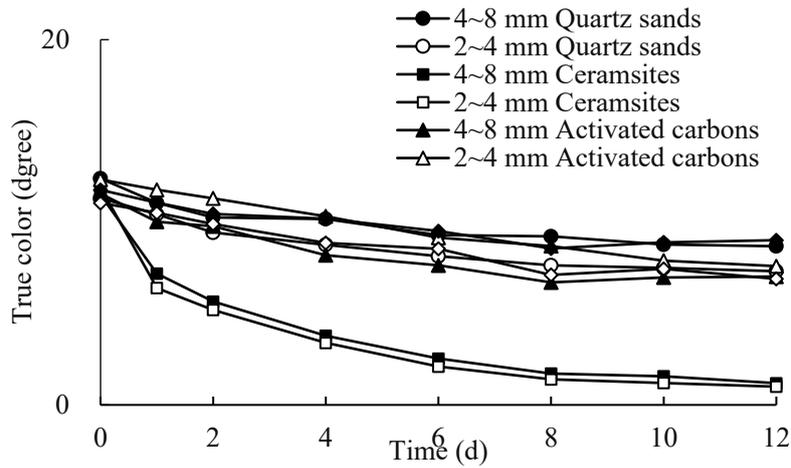
UV₂₅₄ 和 UV₂₈₀ 可以表征水中有机物芳构化的程度，值越大表示芳构化程度越高。E₂₅₀/E₃₆₅ 表示有机物分子量和聚合度，E₂₅₀/E₃₆₅ 越大，表示分子量和芳构化程度越小。发色团溶解有机物 (CDOM) 是溶解有机物 (DOM) 的重要组成部分，它是一种复杂的组分，主要包括类蛋白质 (类色氨酸、类络合物等) 和腐殖质 (短波腐殖质和长波腐殖质)。表 2 显示，陶粒处理水的 UV₂₅₄ 和 UV₂₈₀ 值以及 CDOM 吸光系数明显较低，E₂₅₀/E₃₆₅ 都明显高于其他基质，可以看出处理后水的芳构化程度、有机物构型、分子量大小、聚合度明显降低，有色溶解性有机物得到较好的去除。



(a) 浑浊度

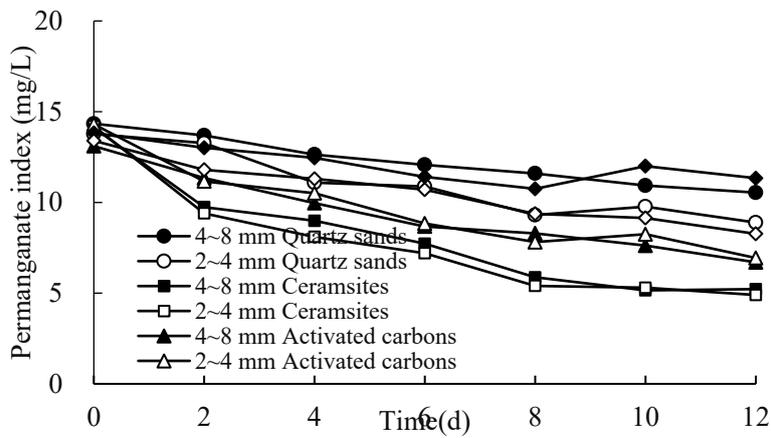


(b) 外观颜色

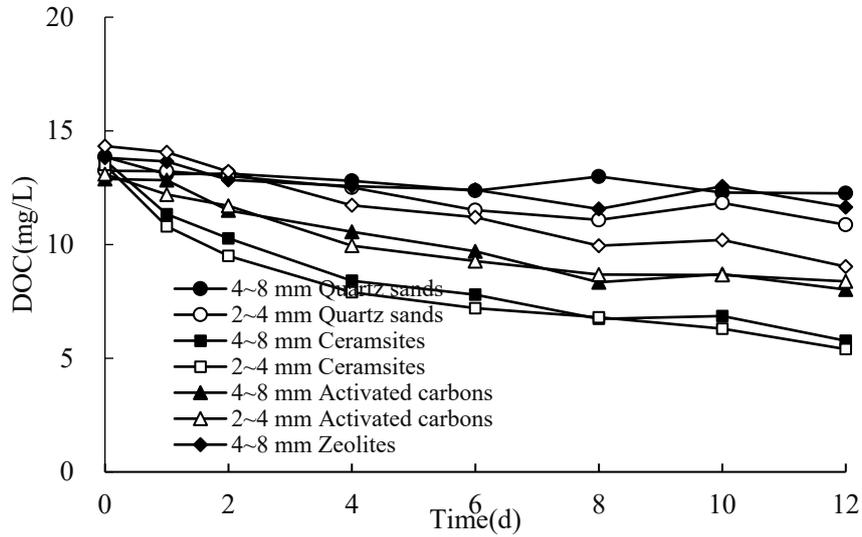


(c) 真实色彩

图1 不同基质下浊度及色度的去除效果



(a) 高锰酸盐指数

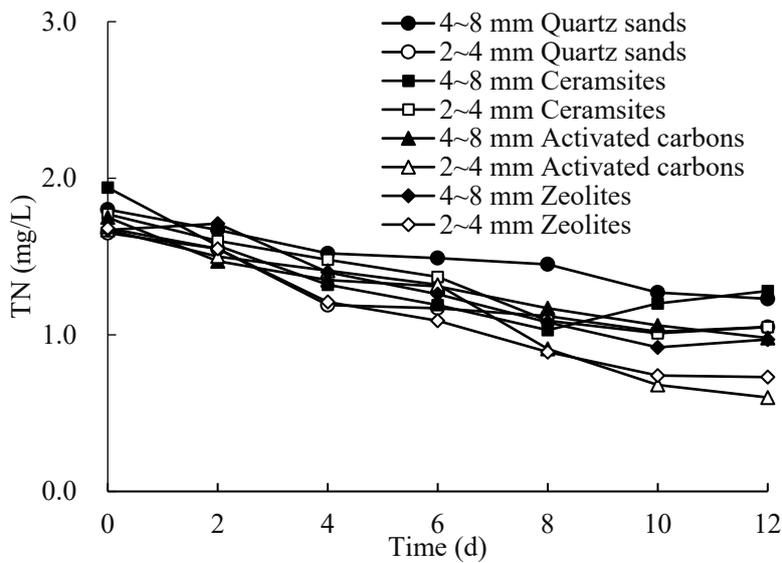


(b) DOC

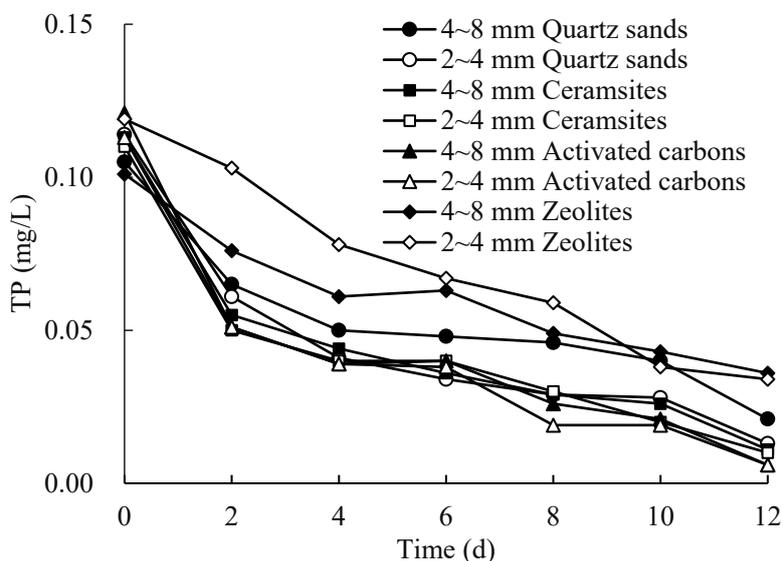
图2 不同基质下高锰酸盐指数与 DOC 的去除效果

表2 不同基质下有机物相关指标去除效果

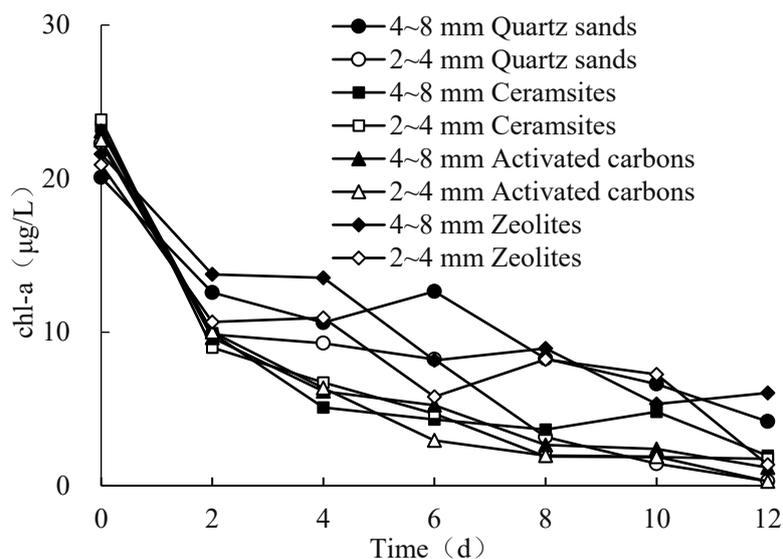
	真彩色 (度)	紫外线 ₂₅₄	紫外线 ₂₈₀	E250/E365
影响力	9.8	0.161	0.118	6.6
4~8mm 石英砂	9.0	0.151	0.110	6.8
2~4mm 石英砂	7.0	0.128	0.092	7.8
~8mm 陶粒	1.2	0.029	0.022	10.0
~4mm 陶粒	0.9	0.026	0.019	10.8
4~8mm 活性炭	6.4	0.096	0.070	7.1
2~4mm 活性炭	6.8	0.102	0.078	6.8
4~8 毫米沸石	9.1	0.151	0.111	6.2
2~4mm 沸石	6.9	0.120	0.088	7.4



(a) TN



(b) TP



(c) 浮游藻类 chl-a

图3 不同基质下 TN、TP、及浮游藻类 chl-a 的去除效果

3.1.3 总氮、总磷及浮游藻类去除

TN、TP、浮游藻类是评价湖泊富营养化程度的重要指标，浓度越高表示湖泊富营养化越严重。浮游藻类的浓度可以通过浮游藻类叶绿素 a 的浓度间接反映，叶绿素 a 是水中生物悬浮物的主要成分，它的存在会使水体的浊度增加、表面色泽变差，从而影响观感效果。

田纳西州各基质的去除效果如图 3 (a) 所示。从粒径来看，2~4mm 活性炭对 TN 的去除效果最好，其次是 2~4mm 和 4~8mm 沸石。活性炭和沸

石都具有良好的吸附性能，尤其是沸石对氨氮的吸附效果明显，因此对 TN 表现出更好的去除效果^[10]。从粒径来看，各基质均表现出小粒径的去除效果优于大粒径，这与其他研究的结果一致^[11]。与其他指标相比，TN 去除率较低，且研究发现 TN 主要以溶解状态存在，相对于悬浮状态来说 TN 更难去除。

各基质对景观封闭水体 TP 去除效果处理效果如图 3 (b) 所示。活性炭、陶粒对 TP 的去除率最高，其次是石英砂和沸石。水中的磷主要以悬浮状态存在，且常附着在颗粒物上，因此 TP 的去除方式

与浊度关系较大,可通过拦截、吸附等方式去除 TP。

叶绿素 a 的去除效果如图 3 (c) 所示, 2 种粒径的活性炭和陶粒对浮游藻类叶绿素 a 的效果均优于石英砂和沸石, 且稳定性较好。运行第 4 天浮游藻类叶绿素 a 浓度降至 7 $\mu\text{g/L}$ 以下; 第 12 天降至 2 $\mu\text{g/L}$ 以下。此外, 2~4mm 的石英砂也能起到拦截的作用, 有效去除水中的浮游藻类。

总体而言, 陶粒对浊度、色度、有机物、TP、浮游藻类均有明显的去除效果, 尤其对色度和 CDOM 的去除效果显著, 陶粒对浊度、表层色度、本色度的去除率分别可达 93.8%、94.6%、91.7%; 对高锰酸盐指数、TN、TP、浮游藻类的去除率分别为 64.3%、38.9%、90.9%、92.4%, 处理后出水达到地表水 III 类水质要求, 且水体芳构化程度、有机物结构化程度、分子量大小及聚合度均明显降低, 建议采用陶粒作为处理封闭式景观废水的人工湿地功能层基质。

4 结论

研究表明, 与石英砂、活性炭、沸石相比, 陶粒对景观小水体的净化能力更佳, 经过 12d 的处理, 4~8mm 陶粒对水体的感官效果有明显改善, TN 达到地表水 IV 类标准, TP 和高锰酸盐指数满足地表水 III 类标准要求。总体而言, 本研究中最适合的人工湿地基质为 4~8mm 陶粒。

参考文献

- [1] Nuamah A L, Li Y, Pu Y, et al. Constructed wetlands, status, progress, and challenges. The need for critical operational reassessment for a cleaner productive ecosystem [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269:122340.
- [2] Ji Z H, Tang W Z, Pei Y S. Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal [J]. *Chemosphere*, 2021, 286:131564.
- [3] Cui E P, Zhou Z C, Gao F, et al. Roles of substrates in removing antibiotics and antibiotic resistance genes in constructed wetlands: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 85:160257.
- [4] Chao Y, Zhang X L, Tang Y Q. Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 49 103140.
- [5] Yang Y, Zhao Y, Liu R, et al. Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 441-452.
- [6] Wang H, Xu J, Sheng L. Purification mechanism of sewage from constructed wetlands with zeolite substrates: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258:120760.
- [7] Zhang X, Zhao S, Gao J, et al. Microbial action and mechanisms for Cr(VI) removal performance by layered double hydroxide modified zeolite and quartz sand in constructed wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246:636-646.
- [8] Dai H L, Hu F P. Phosphorus Adsorption Capacity Evaluation for the Substrates Used in Constructed Wetland Systems: A Comparative Study [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(3):1003-1010.
- [9] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, twentieth ed. American Public Health Association, Washington, DC, USA. 1988.
- [10] Patyal V, Jaspal D, Khare K. Materials in constructed wetlands for wastewater remediation: A review [J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(12):2853-2872.
- [11] Xu L, Chen L Q, Zhuang M. Treating graywater using quartz sand filters: the effect of particle size, substrate combinations, and reflux ratio [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2020, 131-138.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS