

引用格式: 肖森培, 韩玉国, 王梦瑶, 等. 鹅卵石基质不同覆盖率对苦草净化水质效果的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(X): 1–9. XIAO Senpei, HAN Yuguo, WANG Mengyao, et al. Effect of different coverage rates of cobblestone substrate on purification of water quality by *Vallisneria natans*[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(X): 1–9.

鹅卵石基质不同覆盖率对苦草净化水质效果的影响

肖森培¹, 韩玉国^{1,2}, 王梦瑶³, 李虹玮⁴, 刘 臻¹, 张文谦¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200; 3. 北京市水资源调度管理事务中心, 北京 101117; 4. 北京市延庆区林业工作站, 北京 102100)

摘要: 【目的】通过在种植苦草 *Vallisneria natans* 的基质底泥上用鹅卵石基质以不同面积覆盖, 探讨苦草在不同生长环境下净化水体污染的能力及效果, 为水生态修复及应用提供数据支持。【方法】2024 年 5—10 月, 以砂壤土为栽种苦草的基质底泥, 鹅卵石为覆盖基质, 通过人工栽植试验, 分别在鹅卵石覆盖率为 0、30%、60%、70%、80%、90% 的条件下, 研究苦草对水体中的总氮、总磷和砷的净化效果。【结果】在不同面积的鹅卵石基质覆盖下, 苦草对水中总氮、总磷和砷的净化均存在差异。具体表现为随着鹅卵石覆盖率的增高, 水中污染物去除率总体呈先上升后下降再上升的趋势。苦草本身是净化水质的主要途径, 此外, 污染物沉淀以及基质底泥和鹅卵石的吸附作用也对水质净化起到一定作用。总氮去除率在鹅卵石覆盖率为 30% 时最高, 质量浓度从最初的 $31.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 94.93%; 总磷去除率在鹅卵石覆盖率为 30% 时最高, 质量浓度从最初的 $1.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 97.43%; 砷去除率在鹅卵石覆盖率为 30% 时最高, 质量浓度从最初的 $967.33 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $4.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率为 99.59%。方差分析表明: 鹅卵石基质不同覆盖率对水体中的总氮、总磷和砷的去除效果具有显著差异 ($P < 0.05$)。【结论】鹅卵石基质不同覆盖率会对苦草净化水质的效果产生影响。当鹅卵石基质覆盖率为 30% 时, 苦草对水体中的总氮、总磷、砷的去除效果最好。图 4 表 3 参 37

关键词: 鹅卵石; 覆盖率; 苦草; 净化水质; 总氮; 总磷; 砷

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)00-0001-09

Effect of different coverage rates of cobblestone substrate on purification of water quality by *Vallisneria natans*

XIAO Senpei¹, HAN Yuguo^{1,2}, WANG Mengyao³, LI Hongwei⁴, LIU Zhen¹, ZHANG Wenqian¹

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Soil and Water Conservation, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County, Shanxi Province, Beijing Forestry University, Jixian 042200, Shanxi, China; 3. Beijing Water Resources Dispatching and Management Center, Beijing 101117, China; 4. Beijing Yanqing District Forestry Workstation, Beijing 102100, China)

Abstract: [Objective] By covering the substrate sediment of *Vallisneria natans* with cobblestone substrate at different coverage rates, discussion on the ability and effect of *V. natans* in purifying water pollution in different growth environments, providing data support for water ecological restoration and application. [Method] From May to October 2024, using sandy loam soil as the substrate for planting *V. natans* and pebbles as the covering substrate, artificial planting experiments were conducted to study the purification effect of *V. natans* on total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and arsenic (As) in water at cobblestone coverage rates of 0, 30%, 60%,

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-07-06

基金项目: 北京市科技计划项目 (Z13110500381310)

作者简介: 肖森培 (ORCID: 0009-0007-3061-4096), 从事生态修复学研究。E-mail: xsp925686553@163.com。通信作者: 韩玉国 (ORCID: 0000-0002-7980-0259), 教授, 博士, 从事面源污染研究。E-mail: yghan@bjfu.edu.cn

70%, 80%, and 90%, respectively. [Result] Under different coverage rates of cobblestone substrate, the purification of TN, TP and As in water by *V. natans* was different. With the increase of coverage rate, the overall removal rate of pollutants in water increased first, then decreased, and then increased. *V. natans* itself was the main way to purify water quality, followed by pollutant precipitation and the adsorption of substrate sediment and cobblestones. The TN removal rate was highest when the cobblestones coverage rate was 30%, decreasing from the initial $31.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $1.59 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with a removal rate of 94.93%; The TP removal rate was highest when the cobblestones coverage was 30%, decreasing from the initial $1.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with a removal rate of 97.43%; The removal rate of As was highest when the cobblestones coverage was 30%, decreasing from the initial $967.33 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ to $4.00 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, with a removal rate of 99.59%. Analysis of variance showed that there were significant differences ($P < 0.05$) in the removal efficiency of TN, TP and As in water with different cobblestones coverage rates. [Conclusion] The coverage rate of cobblestones have an impact on the purification of water quality by *V. natans*. When the coverage rate was 30%, *V. natans* has the best removal effect on TN, TP, and As in the water. [Ch, 4 fig. 3 tab. 37 ref.]

Key words: cobblestone; coverage rate; *Vallisneria natans*; purification of water quality; total nitrogen; total phosphorus; arsenic

中国部分地区水体污染比较严重^[1], 利用水生植物净化水体污染已经成为主要的生态手段。苦草 *Vallisneria natans* 是一种适应能力极强的沉水植物, 广泛存在于河流湖泊中, 它不仅可以反映水体受污染程度, 还可以对水质起到净化作用, 在水生植物应用等相关领域占据重要的地位^[2-3]。苦草净化水体污染的能力与自身长势和周边环境息息相关, 栽种苦草的底泥上用鹅卵石以不同面积覆盖会对苦草接收光照、水体养分交换、根系生长等产生影响, 从而影响净化水质的效果。因此, 探讨鹅卵石基质不同面积覆盖是如何影响苦草净化水质, 不仅对实际应用具有重要意义, 也为水生态修复提供数据支持。

苦草能够吸收水中氮磷等养分元素^[4]和重金属^[5], 降低水中藻类的密度从而净化水质, 同时通过根系的吸附作用固定底泥中的污染物^[6], 具有较强的吸附营养盐和其他污染物的能力^[7]。水体的基质类型和特征对苦草生长发育至关重要, 合适的基质可以促进苦草生长和发育^[8], 从而影响苦草净化污染物的效果。李宽意^[9]研究了不同基质对苦草生长发育的影响, 发现基质种类对稀疏种植的苦草生长具有显著影响, 而对于密集种植的苦草则影响不大。徐扬帆等^[10]研究了4种改性材料的麦饭石基质对苦草生长的影响, 发现不同改性麦饭石对苦草的促生效果不同。董百丽等^[11]研究了3种改良过的基质对苦草生长的影响, 发现3种处理对化学特性的影响较小, 而对物理特性的影响则较为显著。谢贻发等^[12]研究了各类基质对苦草生长和形态特征的影响, 发现苦草能够适应富营养化的基质环境, 但如果氮磷等有机物质含量过高时, 苦草的生长也会受到负面影响, 且苦草在不同基质上能够表现出良好的生长可塑性。钱珍余等^[13]对苦草在不同基质材料(磨石、碎石、鹅卵石)下净化水体中的氨氮、总磷、高锰酸钾指数和改善水体溶解氧的效果及其生物量变化进行了研究, 发现3种基质对水体净化均有促进作用, 且鹅卵石基质对苦草生物量增量最大。王颖等^[14]研究了植物加入碎石基质对污水净化的效果, 发现植物加入碎石组对净化水中氮磷有促进作用。

目前, 关于基质对苦草的研究大多都是针对于单种基质、不同基质或改良过的基质, 而基质覆盖面积的大小对净化水质的影响研究较少。因此, 本研究通过在种植苦草的基质底泥上用鹅卵石以不同面积进行覆盖, 对不同覆盖条件下苦草净化水中总氮、总磷和砷的效果进行研究, 以为水生态修复及应用提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区位于北京市昌平区亭自庄村轻工业环境保护研究所生态修复实验基地 ($40^{\circ}10'40''\text{N}$,

116°08'31"E)。试验选取典型沉水植物苦草，通过网购购置于江苏宿迁的养殖场。

试验基质取自于试验基地内，分别为砂壤土和鹅卵石。砂壤土用作栽种苦草的基质底泥，初始参数指标：有机质为 $10.13\sim 10.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，总氮为 $0.42\sim 0.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮为 $42.12\sim 53.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，总磷为 $0.53\sim 0.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效磷为 $7.46\sim 8.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，砷为 $7.47\sim 7.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。鹅卵石用作覆盖在底泥上的基质，鹅卵石粒径及质量分布占比如表 1 所示。试验用水抽取于顺义区温榆河水生活污水排放处 ($40^{\circ}00'15''\text{N}$, $116^{\circ}38'06''\text{E}$)。

表 1 鹅卵石粒径及质量分布

Table 1 Particle size and weight distribution of pebbles	
粒径(d)/mm	质量占比/%
$d\geq 20.00$	44.05 ± 4.05
$10.00\leq d<20.00$	47.61 ± 3.34
$5.00\leq d<10.00$	7.39 ± 4.35
$0.25\leq d<5.00$	0.35 ± 0.38
$d<0.25$	0.60 ± 0.17

1.2 研究方法

将采购回的苦草植株剔除杂物，用大量清水洗净，放入准备好的水箱中，水箱直径约 50 cm，高约 70 cm，水箱以细砂作为固定的基底，加入一定量的 Hoagland 营养液，适应性培养 2 周作为预处理。

将砂壤土过 5 mm 筛用作基质底泥，过完筛的土样装桶，每桶装 26 kg，取其中一部分基质底泥送检，测底泥中的砷质量分数。选取预处理后生长一致的苦草植株 (7 g)，用去离子水洗净后种植于上直径、下直径、高分别为 65、40、85 cm 的白色塑料桶中，摆放整齐。为防止因高温和降水影响试验结果，把塑料桶安置在遮阳网和遮雨棚之下。

在种植苦草的基质底泥上用鹅卵石基质以不同的面积进行覆盖。试验共设置 6 个处理，覆盖率分别为 0、30%、60%、70%、80%、90%。设空白对照 (ck)，该对照不种植苦草，不覆盖鹅卵石，只有基质底泥和试验用水。每个试验桶鹅卵石用量约 0~1 kg，加入试验用水 50 L，水位高约 30 cm，之后向每个试验桶中加入 1 瓶砷标准储存液 (每瓶 50 mL，质量浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 用于模拟砷污染，初次加砷后取水送检。试验初期，桶中水质状况：总氮为 $31.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，总磷为 $1.57\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，砷为 $967.33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，基质底泥中的砷为 $7.72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每种处理重复 3 次，试验于 2024 年 5 月开始至 2024 年 10 月结束。

1.3 样品采集与测试方法

测定水样中的氮、磷及砷质量浓度。试验开始时 (6 月，0 d) 采集 1 次，之后的 7 月 (30 d)、8 月 (60 d)、9 月 (90 d) 分别采集 1 次，总计 4 次水样采集，其中，氮、磷水样总计 4 次采集，砷水样分别在 6、7、8 月采集，总计 3 次；测定底泥中的砷质量分数，试验开始时 (6 月，0 d) 采集 1 次，之后 7 月 (30 d)、8 月 (60 d) 分别采集 1 次，总计 3 次底泥采样。在每次进行采样之前，需向桶中补充去离子水，以确保桶内的水位保持不变。从水面下方 10 cm 的位置处，采集 250 mL 的水样，底泥在 10 cm 深处取样，并在获取后立即送检。总氮用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定 (HJ 636—2012)，总磷用钼酸铵分光光度法测定 (GB 11893—89)，水中砷用原子荧光法测定 (HJ 694—2014)，基质底泥中砷用原子荧光法测定 (GB/T 22105.2—2008)。

在完成所有试验之后对植物的生物量进行测定。首先使用去离子水将采集的植物样本清洗干净，用吸水纸去除植物表面残留的水分，称取植物的鲜质量，然后将植物放入烘箱中进行烘干处理，最后称其干质量。

1.4 数据处理

总氮、总磷和砷的去除率 (R) 计算公式为： $R=(C_0-C_i)/C_0\times 100\%$ 。其中， C_i 为第 i 次总氮、总磷或砷的质量浓度， C_0 为总氮、总磷或砷的初始质量浓度。

使用 Excel 2022 整理数据，利用 SPSS Statistics 27 进行单因素 ANOVA 显著性分析，显著性水平为 0.05，用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 水中总氮去除效果

如图 1 所示：在 30 d 时，水中总氮去除率均能超过 50%，其中鹅卵石基质覆盖率为 60% 和 80% 的

处理总氮去除率较高, 分别达 70.32% 和 68.56%, 各处理水中总氮质量浓度均下降至 9.30~15.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在 60 d 时, 除鹅卵石基质覆盖率为 0 的处理外, 其余处理对总氮去除率均稳定在 70%~80%, 各处理水中总氮质量浓度维持在 6.48~11.7 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 内; 在 90 d 时, 鹅卵石基质覆盖率为 30% 的处理中, 苦草对水中总氮去除效果最好, 去除率高达 94.93%, 质量浓度低至 1.59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除鹅卵石基质覆盖率为 90% 的处理外, 与其他处理相比差异显著 ($P<0.05$)。

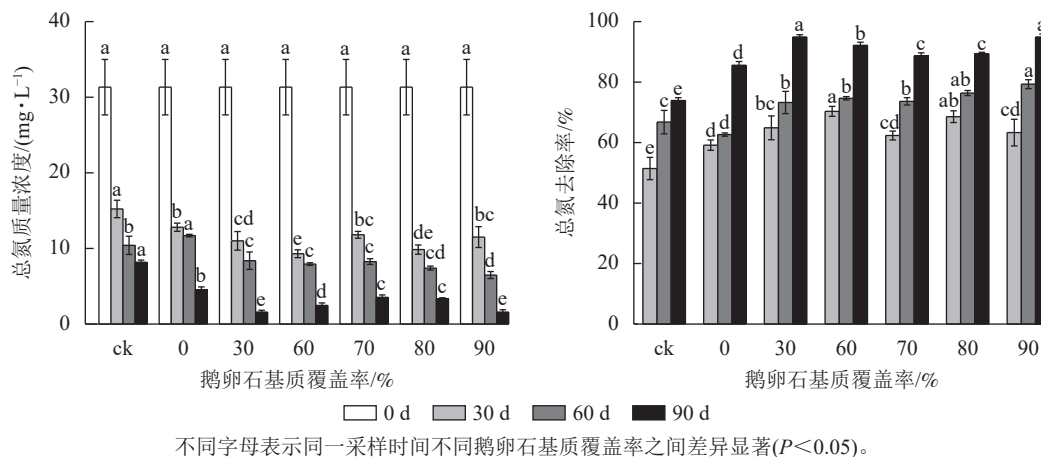


图 1 水中总氮质量浓度和对应去除率变化

Figure 1 Changes in total nitrogen concentration and corresponding removal rate in water

2.2 水中总磷去除效果

如图 2 所示: 在 30 d 时, 水中总磷去除率就能达到较大值 (均超过 80%), 水中总磷质量浓度均下降至 0.14~0.52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在 60 d 时, 鹅卵石基质覆盖率为 0、60%、70%、80% 的苦草对水中总磷去除率均超过 90%, 此时总磷质量浓度为 0.10~0.35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在 90 d 时, 各处理水中总磷去除率均稳定在 94%~98%, 其中鹅卵石基质覆盖率为 30% 的苦草对水中总磷去除率最高, 为 97.43%, 质量浓度最低, 为 0.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 除覆盖率为 0 的处理外, 覆盖率为 30% 的处理与其他处理相比差异显著 ($P<0.05$)。

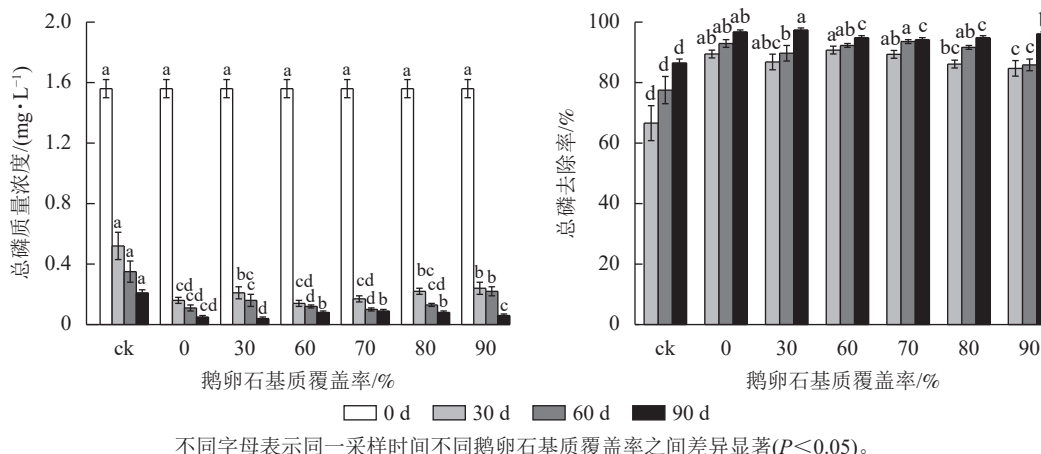
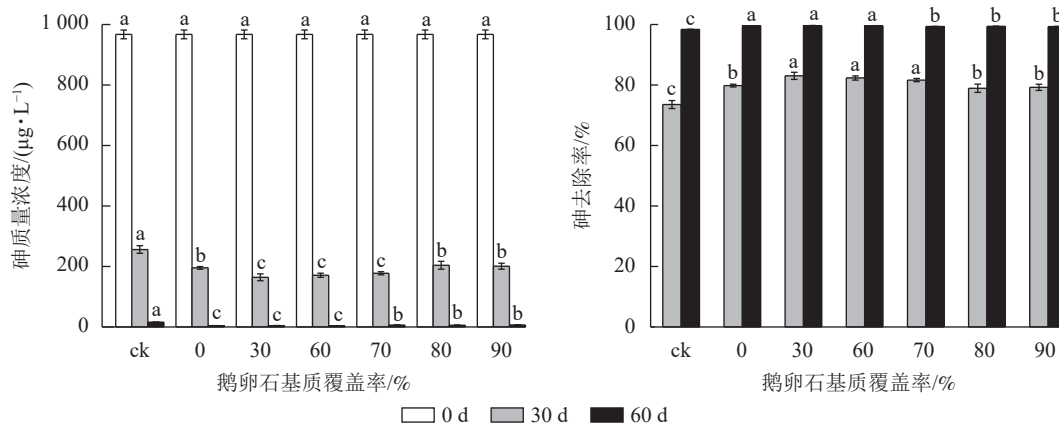


图 2 水中总磷质量浓度和对应去除率变化

Figure 2 Changes in total phosphorus concentration and corresponding removal rate in water

2.3 水中砷去除效果

如图 3 所示: 在 30 d 时, 水中砷去除率增长均超过 70%, 砷质量浓度为 164.18~256.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中鹅卵石基质覆盖率为 30% 的砷去除效果最好, 达 83.03%; 在 60 d 时, 各处理砷去除率均达到最大值, 数值均超过 99%, 此时水中砷质量浓度从最初的 967.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 4.00~15.80 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 内, 鹅卵石基质覆盖率为 30% 的水中砷质量浓度最低 (4.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 去除率最高 (99.59%), 除覆盖率为 0 和 60% 的处理外, 覆盖率为 30% 的处理与其他处理相比差异显著 ($P<0.05$)。



不同字母表示同一采样时间不同鹅卵石基质覆盖率之间差异显著($P < 0.05$)。

图 3 水中砷质量浓度和对应去除率变化

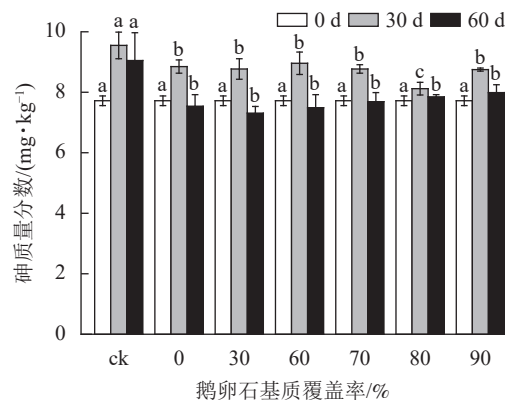
Figure 3 Changes in arsenic concentration and corresponding removal rate in water

2.4 基质底泥中的砷质量分数变化

如图 4 所示：在 30 d 时，所有处理底泥中的砷质量分数都不断升高，ck 的砷质量分数最高，达 $9.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，其次是鹅卵石基质覆盖率为 60% 的处理，达 $8.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，除覆盖率为 80% 的处理砷质量分数上升较低外，其余处理的砷质量分数均稳定上升到 $8.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右；在 60 d 时，底泥中砷质量分数不断下降，其中，覆盖率为 30% 的处理中底泥最终砷质量分数最低，为 $7.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，苦草根系对该处理底泥中的砷吸收效果最好，除 ck 外，该处理与其他处理之间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 苦草对污染物的吸收量

从表 2 可知：苦草最终生物量由高到低依次为 30%、90%、60%、80%、70%、0 的鹅卵石基质覆盖率处理，平均干质量分别为 8.028、7.719、7.221、6.806、6.694、6.584 g。通过计算得出，30% 的鹅卵石基质覆盖率对苦草净化水质的效果最佳。



不同字母表示同一采样时间不同鹅卵石基质覆盖率之间差异显著($P < 0.05$)。

图 4 基质底泥中的砷质量分数变化

Figure 4 Changes in arsenic content in substrate sediment

表 2 苦草最终生物量及对污染物的吸收量

Table 2 Final biomass of *V. natans* and its absorption of pollutants

鹅卵石基质覆盖率/%	鲜质量/g	干质量/g	总氮/mg	总磷/mg	砷/mg
0	65.804±2.252	6.584±0.167	272.578±6.914	32.262±0.818	1.646±0.042
30	95.700±1.972	8.028±0.440	332.359±18.216	39.337±2.156	2.007±0.110
60	81.333±1.296	7.221±0.313	298.936±12.958	35.381±1.534	1.805±0.078
70	72.600±1.628	6.694±0.224	277.132±9.274	32.801±1.098	1.674±0.056
80	79.602±2.333	6.806±0.263	281.768±10.888	33.349±1.289	1.702±0.066
90	90.800±2.018	7.719±0.691	319.553±28.607	37.821±3.386	1.930±0.173

从表 3 可知：鹅卵石基质覆盖率为 30% 的苦草处理组水中污染物质量最低。而 3 种污染物进入基质底泥的质量大小各不相同，其中总氮由高到低依次为 90%、30%、60%、80%、70%、0 的鹅卵石基质覆盖率处理，总磷由高到低依次为 0、70%、80%、60%、90%、30% 的鹅卵石基质覆盖率处理，砷由高到低依次为 0、70%、80%、60%、30%、90% 的鹅卵石基质覆盖率处理。进入基质底泥的污染物大部分留在土壤中，少部分会被微生物利用或被植物根系吸收。

表 3 水中污染物质量和进入基质底泥中的污染物质量

Table 3 Pollutant content in water and pollutant content in substrate sediment

鹅卵石基质覆盖率/%	水中			底泥		
	总氮/mg	总磷/mg	砷/mg	总氮/mg	总磷/mg	砷/mg
0	226.000±19.500	2.500±0.500	0.210±0.014	1 067.922±12.586	43.238±1.318	46.511±0.028
30	79.500±11.500	2.000±0.500	0.200±0.045	1 154.641±6.716	36.663±2.656	46.160±0.154
60	123.000±16.500	4.000±0.500	0.200±0.013	1 144.555±3.542	38.618±1.034	46.361±0.091
70	177.000±15.500	4.500±0.500	0.315±0.016	1 112.368±6.226	40.699±0.598	46.378±0.072
80	166.500±7.500	4.000±0.500	0.290±0.035	1 118.232±3.388	40.651±1.789	46.375±0.100
90	79.500±15.000	3.000±0.500	0.330±0.034	1 167.438±43.607	37.177±2.886	46.107±0.139

3 讨论

3.1 鹅卵石基质不同覆盖率对苦草氮磷去除效果的影响

试验前期 (30 d), 各处理的总氮和总磷去除率均有提升, 鹅卵石对苦草起固定作用, 同时不同覆盖率使得苦草对光^[15]的吸收效率有所不同, 苦草生长及净化氮磷的效率也会受到影响^[16]。适量的氮元素可以与磷元素产生协同作用, 促进苦草对总磷的吸收^[17]。试验中期 (60 d), 各处理的总氮和总磷去除率缓慢增高, 微生物和藻类发挥净化作用, 鹅卵石作为覆盖基质, 空隙可为微生物提供适宜的生存环境^[18], 也可为藻类提供附着位点^[19], 从而增加了植物和微生物之间的物质交换以及水体中的养分与基质的交互作用。空白对照组部分养分被去除, 是因为基质底泥对其的吸附和微生物的利用, 例如硝化和反硝化细菌, 同时部分氮元素可转变为氨氮^[20]挥发到空气中, 磷元素可结合特定的金属离子或水中的悬浮颗粒物沉淀到底部^[21], 被基质底泥吸收或被微生物利用。无覆盖处理对总氮去除率低于空白对照, 可能是该处理的苦草存在枯萎植株, 微生物分解植物残体、腐殖质等含氮有机物, 从而导致氮元素的重新释放^[22]。试验后期 (90 d), 鹅卵石基质覆盖率为 30% 的苦草生物量最大, 对氮磷去除效果最佳。生物量大小是衡量植物净化水质能力的一个指标^[23], 苦草的根、茎、叶等都可以吸收水中的营养物质^[24-25], 生物量越高对富营养化水体中氮磷营养盐的净化效果越好^[26]。

有研究表明: 加入鹅卵石基质的苦草生物量会比加入磨石或碎石生物量更大, 但对于水体中氮磷的净化效果, 却是加入磨石或碎石的效果更好^[13], 这是由于磨石和碎石表面更为粗糙, 可容纳更多的微生物和藻类。鹅卵石对氮磷元素具有一定的物理吸附作用, 以孔隙填充和静电吸附为主^[27], 鹅卵石的存在促进了基质底泥、苦草根系与水体之间的养分利用和交换效率^[28]。本研究后期水体中总氮质量浓度起伏较大, 原因可能是鹅卵石释放出部分氨氮^[29]。加入混合的基质对苦草去污能力也有影响^[30], 底泥+2 层无纺布+玉米 *Zea mays* 芯+生物质焦+砂+水+苦草组合对污水中氮磷去除具有较快的速率, 净水效果较强, 但苦草长势以及生物量并不是最好, 说明基质对污水的净化发挥了巨大作用。

3.2 鹅卵石基质不同覆盖率对苦草富集砷的影响

本研究发现: 30 d 时水中砷质量浓度下降较快, 各处理的砷去除率均超过 70%, 而基质底泥中的砷质量浓度不断增加。这是因为砷的迁移和转化以生物作用、吸附解吸为主, 还受水体 pH、氧化还原电位、磷酸盐、胶体或颗粒性质等因素调控, 可能是因为 pH 和氧化还原电位可通过改变砷的溶解性来调控其毒性, 磷元素影响水生植物砷去除的方式主要是通过与砷元素竞争相同的吸附位点^[31]。水体中的砷有溶解态和悬浮态 2 种形态, 溶解态的砷被水中的颗粒物吸附悬浮于水体, 最终通过沉淀作用转移到基质底泥中^[32]。底泥中含有大量元素, 其中铁、铝、锰的氧化物和氢氧化物是砷的主要吸附剂, 砷可通过专性吸附和非专性吸附固定到铁氧化物表面最终被土壤大量吸收^[33]。对于微生物来说, 不仅可以通过新陈代谢改变砷存在的环境条件, 还能通过分解有机质产生较易络合金属离子的物质^[34]。环境中磷酸根等阴离子^[35]、季节及水流紊动等外界条件也会影响到砷的迁移转化。因此试验 30 d 基质中砷显著增加, 以沉淀作用、底泥吸附为主, 同时苦草对砷也具有吸收作用。试验后期 (60 d), 水中砷去除率均达 99%, 苦草对砷的去除效果主要来源于自身净化, 其茎叶能吸收一定量的砷元素^[36], 鹅卵石对水中砷也具有少量的吸附作用, 砷元素主要停留在鹅卵石粗糙孔隙中, 卵石表面附着一些铁氧化物可与砷发生络合反

应, 从而被吸附在卵石表面^[37]。可见, 鹅卵石促进了水、基质底泥和植物根系间的交互作用。

4 结论

随着苦草的生长, 水体中的污染物逐渐净化, 水质都得到了一定的改善。鹅卵石基质覆盖率为 30% 的苦草对水中氮磷钾的净化效果最佳。研究过程中, 水中部分钾沉淀进入底泥, 致使底泥中的钾质量分数呈先上升后下降的趋势, 其中, 鹅卵石基质覆盖率为 30% 的苦草对底泥中钾吸收最佳。

5 参考文献

- [1] 迟明宏, 刘敏, 徐迎春, 等. 水生观赏植物不同种植组合对富营养化水体的净化效果[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(3): 636–647.
CHI Minghong, LIU Min, XU Yingchun, *et al.* Purification effects of different combinations of ornamental aquatic plants on eutrophic water [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2023, **40**(3): 636–647.
- [2] LI Bin, HAN Zheng, JIANG Ruitong, *et al.* Research on the ecological restoration effects of a *Vallisneria natans* (Lour.) Hara-dominated multitrophic level ecosystem[J/OL]. *Water*, 2024, **16**(7): 1050 [2025-02-27]. DOI: [10.3390/w16071050](https://doi.org/10.3390/w16071050).
- [3] FU Feichao, HUANG Shaobin, HU Heping, *et al.* Transformation of N and S pollutants and characterization of microbial communities in constructed wetlands with *Vallisneria natans*[J/OL]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, **42**: 102186 [2025-02-27]. DOI: [10.1016/j.jwpe.2021.102186](https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102186).
- [4] 陈璇, 孟建军, 孙聪, 等. 芽孢杆菌与密刺苦草联用对水体氮磷的去除效果[J]. *湖北农业科学*, 2025, **64**(4): 84–89.
CHEN Xuan, MENG Jianjun, SUN Cong, *et al.* The removal effects of combination of *Bacillus* and *Vallisneria denseserrulata* on nitrogen and phosphorus in water [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2025, **64**(4): 84–89.
- [5] 侯瑞丹, 彭自然, 何文辉, 等. 苦草对重金属去除效果的对比及其叶绿素荧光特性响应[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, **32**(3): 609–617.
HOU Ruidan, PENG Ziran, HE Wenhui, *et al.* Study on heavy metal removal efficiency and chlorophyll fluorescence response of *Vallisneria natans* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, **32**(3): 609–617.
- [6] 许东, 石先阳, 邓国志, 等. 铁改性竹屑生物炭的添加对苦草 (*Vallisneria spiralis*) 水质净化及其生理特性的影响[J]. *环境工程学报*, 2023, **17**(8): 2768–2776.
XU Dong, SHI Xianyang, DENG Guozhi, *et al.* Effect of adding iron-modified bamboo biochar on water purification and physiological characteristics of *Vallisneria spiralis* [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, **17**(8): 2768–2776.
- [7] TAKAMURA N, KADONO Y, FUKUSHIMA M, *et al.* Effects of aquatic macrophytes on water quality and phytoplankton communities in shallow lakes [J]. *Ecological Research*, 2003, **18**(4): 381–395.
- [8] 郭晶晶, 蔡国俊, 陈瑶琪, 等. 基质类型和物种丰度对沉水植物模块化生长及根系发育的影响[J]. *湖泊科学*, 2023, **35**(5): 1562–1577.
GUO Jingjing, CAI Guojun, CHEN Yaoqi, *et al.* Effects of sediment type and species abundance on modularization growth and root development of submerged macrophytes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(5): 1562–1577.
- [9] 李宽意. 基质类型对两种沉水植物种间关系的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(12): 2624–2627.
LI Kuanyi. Effects of sediment nutrition level on the interspecific relationship between two submerged macrophytes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(12): 2624–2627.
- [10] 徐扬帆, 陈文峰, 李世汭, 等. 不同改性麦饭石基质对苦草生长的影响[J]. *环境保护科学*, 2024, **50**(4): 94–98.
XU Yangfan, CHEN Wenfeng, LI Shimi, *et al.* Effects of different modified maifanite substrate on the growth of *Vallisneria natans* [J]. *Environmental Protection Science*, 2024, **50**(4): 94–98.
- [11] 董百丽, 秦伯强, 龚志军, 等. 三种沉积物改良措施比较及其对苦草生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(12): 2726–2731.
DONG Baili, QIN Boqiang, GONG Zhijun, *et al.* Effects of sediment amendment on *Vallisneria natans* growth [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(12): 2726–2731.
- [12] 谢贻发, 李传红, 刘正文, 等. 基质条件对苦草 (*Vallisneria natans*) 生长和形态特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1269–1272.

- XIE Yifa, LI Chuanhong, LIU Zhengwen, *et al.* Effects of sediments on the growth and morphology of *Vallisneria natans* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(4): 1269–1272.
- [13] 钱珍余, 王晓雪, 钟成华, 等. 不同基质对苦草净化水质效果的影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(36): 13001–13004.
- QIAN Zhenyu, WANG Xiaoxue, ZHONG Chenghua, *et al.* Effect of different substrates on the water purification abilities of *Vallisneria natans* [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(36): 13001–13004.
- [14] 王颖, 马凡凡, 侯迪, 等. 植物基质对受污水体净化效果的研究[J]. *环保科技*, 2013, **19**(1): 1–3, 9.
- WANG Ying, MA Fanfan, HOU Di, *et al.* Purification effect study on polluted water by aquatic plant and substrate [J]. *Environmental Protection and Technology*, 2013, **19**(1): 1–3, 9.
- [15] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- LIU Jiankang. *The Advanced Hydrobiology* [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] 张震, 刘仲伸, 胡宏祥, 等. 3种湿地植物对农田沟渠水体氮、磷的消减作用[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(1): 88–95.
- ZHANG Zhen, LIU Shenshen, HU Hongxiang, *et al.* Removal of nitrogen and phosphorus in farmland ditches using three aquatic plants [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(1): 88–95.
- [17] 龚苗苗, 蔡飞翔, 姜培坤, 等. 沉水植物型生态净化系统处理农田退水的总磷去除动力学研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, **39**(1): 136–145.
- GONG Miaomiao, CAI Feixiang, JIANG Peikun, *et al.* Kinetic modeling of total phosphorus removal from farmland drainage with submerged macrophyte-type ecological purification system [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(1): 136–145.
- [18] DEBRAY R, HERBERT R A, JAFFE A L, *et al.* Priority effects in microbiome assembly [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2021, **20**(2): 109–121.
- [19] 王丹丹, 谢燕琴, 黄跃飞, 等. 青藏高原东部不同盐度湖泊藻类群落特征及其驱动因素[J/OL]. *中国环境科学*, 2025-06-03 [2025-06-25]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250530.002>.
- WANG Dandan, XIE Yanqin, HUANG Yuefei, *et al.* Characteristics and driving factors of algal communities in lakes with different salinities in the eastern Qinghai Tibet Plateau[J/OL]. *China Environmental Science*, 2025-06-03 [2025-06-25]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250530.002>.
- [20] 朱涛, 贺俊, 吴汉青, 等. 水源地水库氮氨负荷变化特征及景观驱动因子分析[J/OL]. *长江科学院院报*, 2025-06-10 [2025-06-25]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20250609.1703.026>.
- ZHU Tao, HE Jun, WU Hanqing, *et al.* Influence of landscape pattern on ammonium nitrogen of water in the Gaoguan reservoir basin[J/OL]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025-06-10 [2025-06-25]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1171.TV.20250609.1703.026>.
- [21] 秦华, 徐冬莹, 康润锋, 等. 磷和砷在不同场地土壤中的吸附特征和迁移规律[J/OL]. *农业环境科学学报*, 2025-05-12 [2025-06-25]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250509.1610.004>.
- QIN Hua, XU Dongying, KANG Runfeng, *et al.* Phosphorus and arsenic adsorption characteristics and migration features in soils from different sites[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025-05-12 [2025-06-25]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250509.1610.004>.
- [22] 高岩, 李志斐, 刘阳, 等. 草型湖泊水生植物残体的生物降解研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, **38**(15): 53–59.
- GAO Yan, LI Zhifei, LIU Yang, *et al.* Biodegradation of aquatic plant residues in macrophytic lake: a review [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, **38**(15): 53–59.
- [23] 陈国梁, 冯涛, 李志贤, 等. 苦草对砷的富集作用[J]. *生态学报*, 2017, **37**(14): 4671–4675.
- CHEN Guoliang, FENG Tao, LI Zhixian, *et al.* Characterization of arsenic accumulation by *Vallisneria natans* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(14): 4671–4675.
- [24] CARIGNAN R. An empirical model to estimate the relative importance of roots in phosphorus uptake by aquatic macrophytes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1982, **39**(2): 243–247.
- [25] RATTRAY M R, HOWARD-WILLIAMS C, BROWN J M A. Sediment and water as sources of nitrogen and phosphorus for submerged rooted aquatic macrophytes [J]. *Aquatic Botany*, 1991, **40**(3): 225–237.
- [26] LIU Lin, GUAN Yuting, QIN Tianjian, *et al.* Effects of water regime on the growth of the submerged macrophyte *Ceratophyllum demersum* at different densities [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2018, **33**(1): 45–56.

- [27] HAMID S H A, LANANAN F, NOOR N A M, *et al.* Physical filtration of nutrients utilizing gravel-based and lightweight expanded clay aggregate (LECA) as growing media in aquaponic recirculation system (ARS)[J/OL]. *Aquacultural Engineering*, 2022, **98**: 102261 [2025-02-25]. DOI: [10.1016/j.aquaeng.2022.102261](https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2022.102261).
- [28] 李檬, 李鹏峰, 孙永利, 等. 雨水污染对城市景观水体水质及苦草生态功能性状的影响[J]. *环境科学学报*, 2024, **44**(7): 241–250.
- LI Meng, LI Pengfeng, SUN Yongli, *et al.* The impact of stormwater pollution on the urban landscape water quality and the functional characteristics of the *Vallisneria natans* [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, **44**(7): 241–250.
- [29] 姜泉良, 李致春, 刘娜. 湖泊沉积物氮磷形态分布特征及其释放模拟研究[J]. *宁夏师范学院学报*, 2023, **44**(7): 53–61.
- JIANG Quanliang, LI Zhichun, LIU Na. Study on distribution characteristics and release modeling of nitrogen and phosphorus in lakes sediments [J]. *Journal of Ningxia Normal University*, 2023, **44**(7): 53–61.
- [30] 史红玉, 贾宇航, 向路宁, 等. 不同基质下的苦草去污能力研究[J]. *安徽农业科学*, 2020, **48**(14): 62–65, 68.
- SHI Hongyu, JIA Yuhang, XIANG Luoning, *et al.* Study on the decontamination ability of *Vallisneria natans* under different matrix [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(14): 62–65, 68.
- [31] 李丽珍, 李淑慧, 张婷. 两种挺水植物对水中砷的吸收转运及形态转化差异[J]. *水生态学杂志*, 2025, **46**(3): 1–12.
- LI Lizhen, LI Shuhui, ZHANG Ting. Absorption, translocation and speciation of arsenic in two macrophytes [J]. *Journal of Hydroecology*, 2025, **46**(3): 1–12.
- [32] 黄玮婷, 白圆, 马睿, 等. 层状双氢氧化物在砷污染水体/土壤修复中的应用研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2024, **36**(3): 1–6.
- HUANG Weiting, BAI Yuan, MA Rui, *et al.* Progress in application of layered double hydroxides in arsenic contaminated water/soil remediation [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2024, **36**(3): 1–6.
- [33] 李仁英, 全红, 李绍通, 等. 不同钝化剂对土壤砷吸附解吸的影响[J]. *土壤*, 2024, **56**(6): 1319–1325.
- LI Renying, QUAN Hong, LI Shaotong, *et al.* Effects of different passivators on adsorption and desorption of arsenic in soil [J]. *Soils*, 2024, **56**(6): 1319–1325.
- [34] OREMLAND R S, HOEFT S E, SANTINI J M, *et al.* Anaerobic oxidation of arsenite in Mono Lake water and by a facultative, arsenite-oxidizing chemoautotroph, strain MLHE-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(10): 4795–4802.
- [35] 樊会锋, 周青, 徐向华, 等. 中国地下水砷浓度时空分布特征及其健康风险评估[J]. *环境生态学*, 2024, **6**(8): 1–14.
- FAN Hui Feng, ZHOU Qing, XU Xianghua, *et al.* Characterization of spatial and temporal distribution of arsenic concentration in groundwater in China and its health risk assessment [J]. *Environmental Ecology*, 2024, **6**(8): 1–14.
- [36] 冉艳淋, 陈国梁. 几种常见沉水植物对砷富集的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2020, **36**(3): 407–415.
- RAN Yanlin, CHEN Guoliang. Arsenic accumulation by submerged plants: a review [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, **36**(3): 407–415.
- [37] BASSAM R, EL ALOUANI M, MAISSARA J, *et al.* Physico-chemical characterization of natural rocks and their valorization on the removal of arsenic from aqueous solution [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, **58**: 1011–1019.