

基质级配方式对生态介质箱修复黑臭水体的效果比较

郭炜超¹, 王趁义^{1,2}, 滕丽华¹, 杨娜¹, 李琳琳²

(1. 浙江万里学院生物与环境学院, 浙江 宁波 315100; 2. 宁波晟乾环境技术开发有限公司, 浙江 宁波 315100)

摘要: 利用人工静态模拟试验, 研究基质级配方式对自主设计的生态介质箱对黑臭水体的净化效果及其对水生植物的 N、P 积累能力和生长的影响。结果表明, 随着处理时间的延长, 各组对污染物的去除率逐渐升高, 其中正级配组和反级配组对 TP、TN 和 NH_4^+-N 的去除效果均优于单的植物组和基质组; 正级配组对水体中 TP 的去除效果优于反级配组, 其去除率达到 66.9%, 且正级配组中的植物对 TP 的积累量大于反级配组与植物组; 而反级配组更有益于对 TN 和 NH_4^+-N 的去除, 其去除率分别达到 69.1% 与 87.4%, 且反级配组中的植物对 TN 的积累量大于正级配组与植物组; 生态介质箱中的植物因素对脱氮除磷的贡献率较低, N、P 的去除主要通过非植物因素(基质和微生物); 除空白组外, 各组对 COD_{Mn} 的去除无显著差异, 说明基质与植物对 COD_{Mn} 的直接去除作用不明显, 更多地依靠于基质与植物载体上附着的微生物的作用; 含有环境吸附材料基质的试验组(正级配组、反级配组和基质组)能使水体 pH 上升, 可有效调节酸性水体; 水生植物苦草(*Vallisneria spiralis* (Lour.) Hara)直接植入底泥(植物组)的方式更适于植物生长。因此, 可通过替换级配方式来满足不同 N、P 污染程度水体的修复效果。

关键词: 水体富营养化; 生态介质箱; 级配方式; 净化效果; 原位修复

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0356-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.054

Effect Comparison of the Substrates Grading Methods on the Restoration of Black-Odor Water Bodies by the Ecological Media Box

GUO Weichao¹, WANG Chenyi^{1,2}, TENG Lihua¹, YANG Na¹, LI Linlin²

(1. College of Biology and Environment, University of Zhejiang Wanli, Ningbo, Zhejiang 315100;

2. Ningbo Shengqian Environmental Technology Development Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315100)

Abstract: The effects of substrates size grading on the purification of black and odorous water by self-designed ecological media boxes and their effects on the accumulation and growth of N and P in aquatic plants were studied by artificial static simulation test. The results showed that with the prolongation of treatment time, the removal rate of each pollutant increased gradually. The removal effect of TP, TN and NH_4^+-N in both progressively-graded groups, anti-graded group was better than that in single plant group and matrix group. The removal efficiency of TP in progressively-graded group was better than that in anti-gradation group, its removal rate reached 66.9%. The accumulation of TP in progressively-graded group was better than that in anti-gradation group and plant group. But the removal efficiency of TN and NH_4^+-N in water in anti-graded group was better than those in progressively-graded group, the removal rates reached 69.1% and 87.4% respectively. The accumulation of TN in anti-gradation group was better than those in progressively-graded group and plant group. The plant factors in the ecological media boxes had a low contribution rate to nitrogen and phosphorus removal. The removal of N and P was mainly through non-plant factors (matrix, microbe). However, except for the blank group, there was no significant difference in the removal of COD_{Mn} between the groups, indicating that the direct removal of COD_{Mn} by substrates and plants is not obvious, and it depends more on the role of microorganisms attached to the substrate and plant carriers. The

收稿日期: 2018-09-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(21207036); 浙江省自然科学基金项目(LY16C150002); 宁波市科技惠民项目(2017C50010); 浙江省“生物工程”一流学科开放基金项目(KF2018004); 浙江省“生物工程”一流学科学生创新项目(CX2017005, CX2017003); 浙江万里学院生态养殖模式与尾水水质调控科技特派团队项目; 浙江万里学院引进人才重点项目(1741000530)

第一作者: 郭炜超(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事水污染生态修复研究。E-mail: wanliys@163.com

通信作者: 王趁义(1964—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事环境污染治理与生态修复研究。E-mail: wcyxz@163.com

experimental group containing the mineral matrix (progressively-graded group, anti-gradation group, and matrix group) could raise the pH of water and effectively regulate the acidic water body. The way in which aquatic plants (*Vallisneria natans* (Lour.) Hara) were directly implanted into the sediment (plant group) is more suitable for plant growth. Therefore, the effect of repairing water bodies with different N, P pollution levels can be satisfied by replacing the substrates size gradations.

Keywords: eutrophication of water body; ecological media box; grading method; purification effects; in situ remediation

随着经济和城市化进程的高速发展,工农业生产废水和生活污水的漏排、雨污混流、初期雨水、污水管网破损外渗、底泥污染和河道流动性差等原因,使水质恶化,形成黑臭水体^[1],这不仅导致水体中的动植物和微生物大量死亡,还严重威胁生态安全,通过食物链危害人类的健康^[2],并影响城市形象。

目前,许多常规的物理法、化学法和生物法等都曾用于富营养化黑臭水体的治理,但收效甚微,各种技术方法的综合手段组合已成为修复黑臭水体的主流技术^[1]。本课题组研发的生态介质箱是一种利用环境吸附材料和天然基质营造出沉水植物和根际微生物生长的环境条件,为微生物提供载体和碳源,并在基质上种植沉水植物的装置,它吸收生态沉床和人工湿地的优点,通过生物修复(水生植物)、微生物修复、湿地修复和环境吸附材料吸附等技术的集成,形成一种“河道+多功能生态悬浮湿地+水生植物”的原位处理技术体系,是一种综合治理技术。它可根据受污染水体的深度不同来灵活调节吃水深度,解决透明度低、不适应于水生植物生长的缺点,能对各类污染物和营养盐等实现多层次梯级吸附利用和有效去除。然而基质级配方式对生态介质箱的净化效果有重要的影响,因此,进行不同基质级配方式对生态介质箱修复黑臭水体的效果研究有重要意义。本研究利用生态介质箱修复黑臭水体,并探究不同基质级配方式对生态介质箱修复黑臭水体的效果及其对水生植物生长的影响,确定生态介质箱对各污染物的净化能力,以期为河道黑臭水体治理提供新技术及其理论依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

水生植物采用苦草,植株初始平均株高为(34.5±0.5)cm,单株平均株重(6.5±0.8)g,试验前用自来水洗去泥土和枯叶,再用去离子水冲洗3遍,然后用稀释好的营养液驯化1周,再用1/2的营养液与1/2的人工废水驯化1周;营养液采用德沃多浓缩营养液,其富含氮、磷、钾以及铁、钙、硼、锰、锌等各种营养元素,稀释的营养液配方为营养液:水为1:400,水生植物苦草(*Vallisneria natans* (Lour.) Hara)与底泥均由宁波晟乾环境技术开发有限公司提供。

试验所用的塑料箱、塑料板、沸石(粒径15~20 mm)、陶粒(粒径10~15 mm)和活性炭(粒径5~8 mm)均购自淘宝。受污染河道水样为人工配制,将自来水暴晒1周后,分别投入KH₂PO₄、KNO₃、NH₄Cl、葡萄糖、CaCl₂、MgSO₄以及微量元素(H₃BO₄、ZnSO₄·7H₂O、MnCl₂·7H₂O、CuSO₄·5H₂O、NaMoO₄、NiCl₂、CoCl₂·6H₂O和KD),水质特征为:TP 5 mg/L, TN 15 mg/L, NH₄⁺-N 10 mg/L, COD_{Mn} 80 mg/L, Ca²⁺ 2.6 mg/L, Mg²⁺ 0.92 mg/L和微量元素(各浓度均<0.15 mg/L), pH 6.5~7.5。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 试验在室外防雨塑料棚中进行,自行设计试验装置(图1)。生态介质箱的规格为20 cm×20 cm×20 cm,塑料箱箱体的周边有均匀的透水孔(除底泥层外),孔径小于基质粒径,将8 cm厚的底泥放入箱底,然后植入4株苦草,底泥上层分别由上往下放入4 cm厚的沸石、陶粒和活性炭等吸附基质材料,粒径分别为沸石15~20 mm,陶粒10~15 mm,活性炭5~8 mm,这3种基质材料是用活动隔板分割的;再用打有4个5 cm孔的塑料板盖住箱体(塑料板表面均打有透水孔),最后将生态介质箱置于15个长×宽×高为65 cm×45 cm×55 cm的160 L水箱,每个水箱分别注入100 L的人工河道污水。设计5个试验处理:空白组(只含水样)、植物组(只含有底泥和苦草,苦草植入含有底泥的生态介质箱内,然后放入水箱中)、基质组(只含有底泥和反级配填充的基质沸石—陶粒—活性炭)、正级配组(苦草直接植入含有底泥的生态介质箱中,并在底泥上层以正级配方式填充的活性炭—陶粒—沸石)和反级配组(苦草直接植入含有底泥的生态介质箱中,并在底泥上层以反级配方式填充的沸石—陶粒—活性炭),3次重复。为排除溶解氧对试验的影响,对水箱作不间断地曝气处理,曝气量为3 L/min。

试验于2017年10月1日至12月1日进行,驯化周期为15天,试验周期为42天,每7天采集1次水样,共6次,于采集日的上午9:00采集水样,每次采集100 mL,并根据水箱水量蒸发情况,用去离子水进行补充,以维持水体总体积不变。

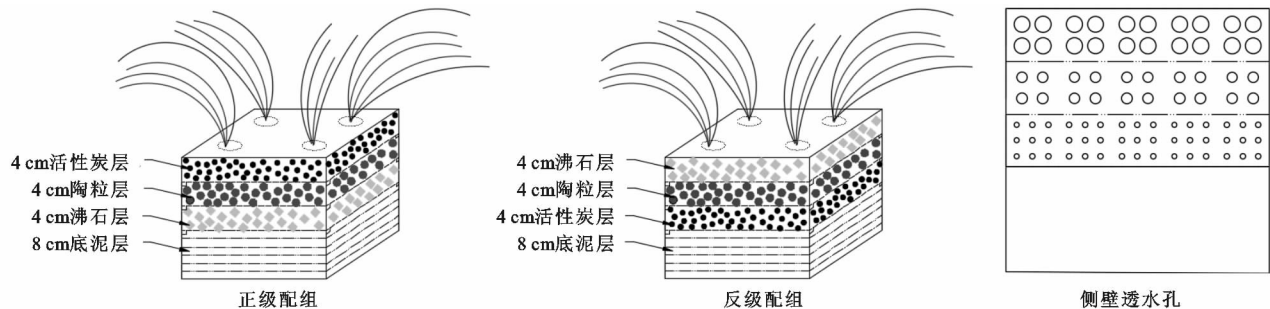


图 1 生态介质箱示意

1.2.2 试验方法与数据处理 试验前后采集装置中的苦草,利用分析天平称量鲜重和干重,用皮尺测定株高,采用文献[3]方法测定植物中的氮、磷含量。利用水样采集器采集水面下 5~10 cm 处的水样,水体中 TP、TN、 NH_4^+-N 、 COD_{Mn} 的浓度和 pH 分别采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—1989)、水杨酸分光光度法(GB 11894—1989)、酸性高锰酸钾法(GB 11892—1989)和便携式 pH 计法测定,并取平均值计算。比较各试验组水体中 TP、TN、 NH_4^+-N 、 COD_{Mn} 和 pH 的变化情况,并比较植物组、正级配组和反级配组修复前后植物的鲜重、株高、含氮量与含磷量的变化。

依据文献[4]的方法计算污染物去除率及植物吸收对氮磷去除的贡献率,公式为:污染物去除率 $\eta = (C_0 - C_1)/C_0 \times 100\%$; 水体氮(磷)削减量 $\Delta m_w = (C_0 - C_1) \times V$; 每克植物氮(磷)积累量 $\Delta m = m_0 - m_1$; 植物对氮(磷)去除贡献 $\gamma = \Delta m / \Delta m_w \times 100\%$ 。式中: C_0 和 C_1 分别为初始和试验结束时的污染物浓度(mg/L); m_0 和 m_1 分别为初始和试验结束时的平均含氮和磷量(mg/g); V 为水样的体积 100 L。

试验数据采用 SPSS 17.0 软件分析,采用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生态介质箱的不同级配方式对模拟废水的净化效果比较

2.1.1 生态介质箱不同级配方式对水体 pH 的影响 在试验的第 42 天时,4 个试验组的 pH 均大于空白组(CK)(图 2)。植物组、基质组、正级配组与反级配组的 pH 在前 14 天均呈明显上升趋势,并且在第 14 天达到最高,之后趋于平衡,而空白组的 pH 略微有所变化。其中基质组、正级配组与反级配组主要受到基质材质的影响^[5],3 组的水体均呈碱性,平均值为 8.41~8.65,而植物组的 pH 略有升高,可能植物的光合作用对水体的 pH 变化有所影响。对不同处理

组的数据进行方差分析表明,正级配组与反级配组对处理后的水体 pH 没有显著性差异($P > 0.05$),而空白组、植物组、基质组与正级配组(反级配组)对处理后的水体 pH 存在显著性差异($P < 0.05$)。

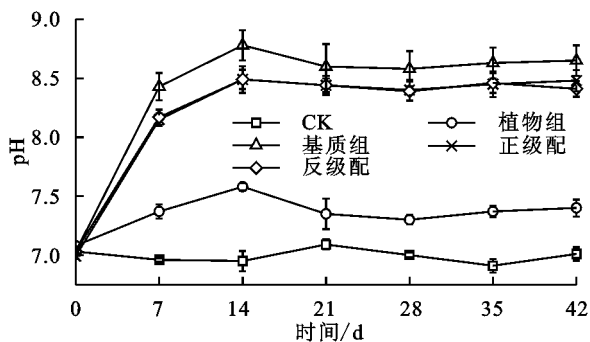


图 2 不同试验组水体 pH 的动态变化

2.1.2 生态介质箱不同级配方式对水体 TN 浓度及其去除率的影响 从图 3 可以看出,不同处理水体中的 TN 浓度均呈下降趋势,且去除率不断提高。试验进行 42 天时,去除率由大到小为反级配组(69.07%) > 正级配组(58.44%) > 基质组(47.32%) > 植物组(29.20%) > 空白组(19.71%),正级配组与反级配组在第 14~21 天有一段明显下降趋势,可能此时的生物膜趋于成熟稳定。不同处理组对水体中 TN 的净化效果存在显著性差异($P < 0.05$),其中反级配生态介质箱对 TN 的去除能力优于正级配生态介质箱。

2.1.3 生态介质箱不同级配方式对 NH_4^+-N 浓度及其去除率的影响 从图 4 可以看出,各组水体中 NH_4^+-N 浓度均呈下降趋势,且去除率不断提高。试验进行 42 天时,各组的去除率由大到小为反级配组(87.34%) > 正级配组(84.35%) > 基质组(75.64%) > 植物组(57.48%) > 空白组(37.77%)。在试验第 7 天时,各组 NH_4^+-N 浓度均迅速下降,之后每组均稳定下降,且在第 35 天后 NH_4^+-N 浓度趋于不变。空白组、植物组、基质组、正级配组与反级配组对水体中 NH_4^+-N 的净化效果均存在显著性差异($P < 0.05$),其中比较正反级配方式的生态介质箱发现,反级配生态介质箱对 NH_4^+-N 的去除能力优于正级配生态介质箱。

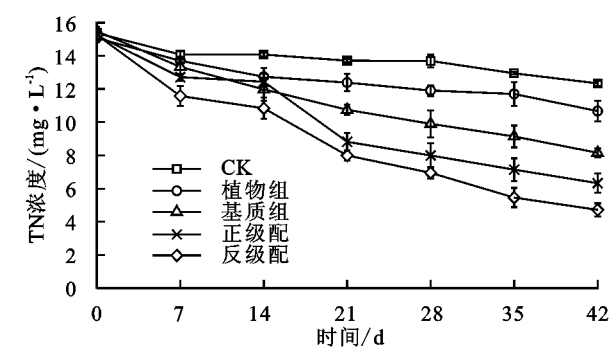


图 3 不同试验组 TN 浓度及其去除率的动态变化

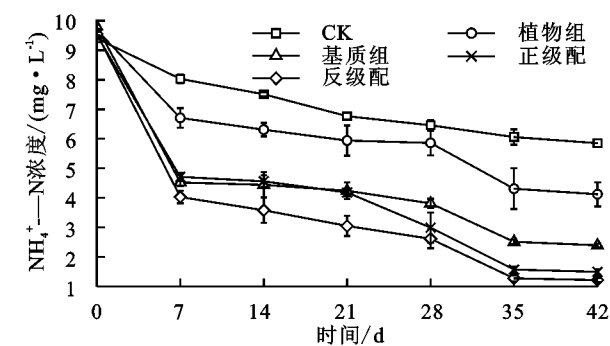
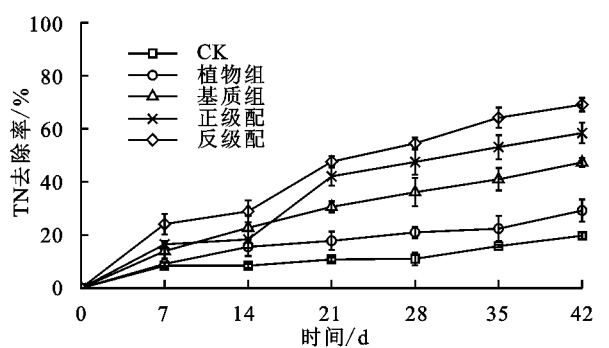
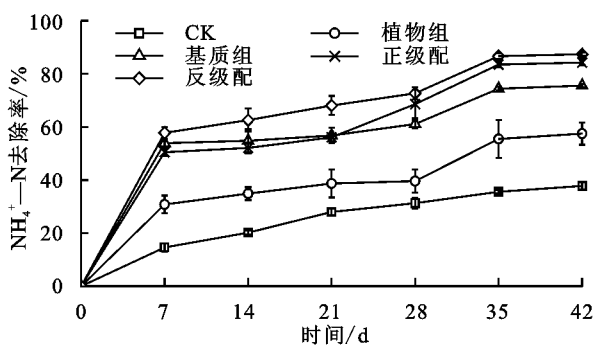


图 4 不同试验组 NH₄⁺-N 浓度及其去除率的动态变化



2.1.4 生态介质箱不同级配方式对 TP 浓度及其去除率的影响 从图 5 可以看出,各组水体中 TP 浓度均呈下降趋势,且去除率不断提高,试验进行 42 天时,各组的去除率由大到小为正级配组(66.95%)>反级配组(59.91%)>基质组(50.00%)>植物组(24.02%)>空白组(13.36%)。空白组、植物组、基

质组、正级配组与反级配组对水体中 TP 的净化效果均存在显著性差异($P<0.05$),而且基质组型对 TP 的去除率远高于非基质组型;植物组在除磷方面较弱,仅比空白组高 10.66%。正反级配方式比较得出,正级配生态介质箱对 TP 的去除能力优于反级配生态介质箱。

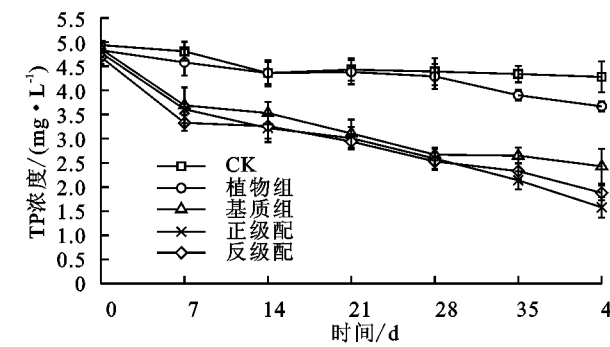
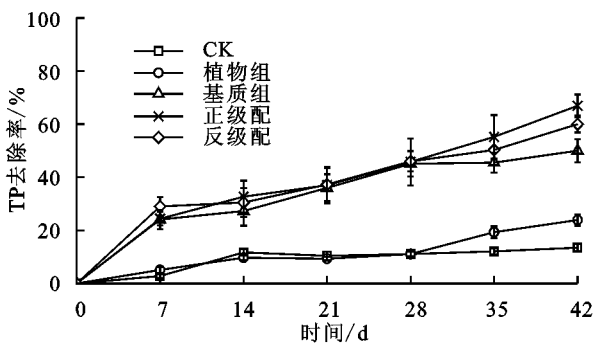


图 5 不同试验组 TP 浓度及其去除率的动态变化



2.1.5 生态介质箱不同级配方式对高锰酸钾指数(COD_{Mn})浓度及其去除率的影响 从图 6 可以看出,各组水体的 COD_{Mn} 浓度均先呈下降趋势,后略微上升。其中空白组对 COD_{Mn} 的去除率最低,仅依靠曝气作用^[6-7],其去除率为 67.28%,而植物组、基质组、正级配组与反级配组的去除率基本相近,且均优于空白组,分别为 86.8%,88.6%,88.4%和 89.3%。在试验前 7 天,各组 COD_{Mn} 迅速下降,并于第 21 天时达到最低。第 21 天之后 COD_{Mn} 略有上升,可能是因为水体在此阶段出现绿藻,绿藻可通过光合作用产生有机物,且藻类本身也是有机物。总体而言,各组均能有效地去除水体中 COD_{Mn} ,植物组、基质组、正级配组与反级配组对水体

中 COD_{Mn} 的净化效果无显著性差异($P>0.05$),且基质级配方式对 COD_{Mn} 的去除并无影响。

2.2 生态介质箱的不同级配方式对植物生长及 N、P 积累量的比较

2.2.1 生态介质箱不同级配方式对植物生长的影响 各处理组中只有植物组、正级配组和反级配组中含有水生植物苦草。试验过程中各组植物均成活,由表 1 可知,植物组、正级配组与反级配组的单株鲜重增量、单株干重增量与株高增量均不同程度增加,且指标增量的差异显著($P<0.05$)。其中植物组各指标的增量均大于正级配组和反级配组,而反级配组的单株鲜重增量与株高增量大于正级配组,单株干重增量并无

显著性差异 ($P>0.05$), 因此将苦草直接植入河泥

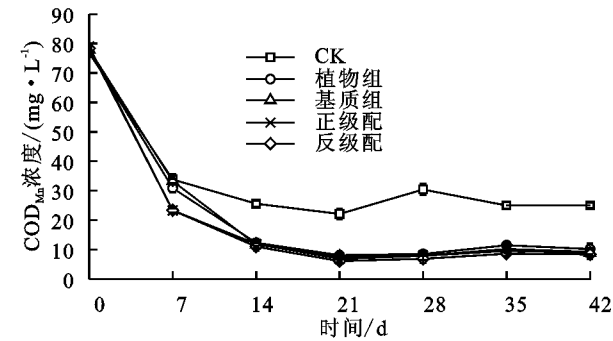


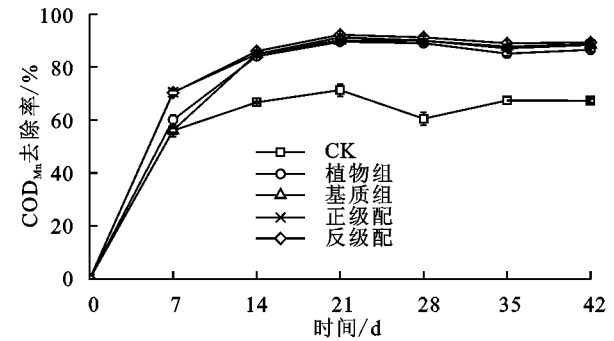
图 6 不同试验组 COD_{Mn} 浓度及其去除率的动态变化

级配方式	单株鲜重	单株干重	株高
	增量/g	增量/g	增量/cm
植物组	3.87±0.62a	0.66±0.14a	11.2±0.9a
正级配组	2.68±0.51c	0.44±0.08b	6.5±1.2c
反级配组	3.08±0.68b	0.49±0.09b	8.1±1.1b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各级配方式差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2.2 生态介质箱不同级配方式对植物 N、P 积累量以及植物去除污染物贡献率的影响 由表 2 可知,植物组、正级配组和反级配组中的苦草对 TN 的积累量由大到小依次为反级配组((37.86±3.84)mg/g)>正级配组((29.19±2.32)mg/g)>植物组((18.48±2.64)mg/g),对水中 TN 去除贡献率由大到小依次

(植物组)更利于其生长。



为植物组((23.52±3.36)%)>反级配组((18.68±1.89)%)>正级配组((17.05±1.36)%) ; 各组苦草对 TP 的积累量由大到小依次为正级配组((13.98±0.96)mg/g)>反级配组((9.80±0.71)mg/g)>植物组((6.24±0.78)mg/g),对水中 TP 去除贡献率由大到小依次为植物组((30.12±3.77)%)>正级配组((22.72±1.56)%)>反级配组((18.14±1.31)%)。其中苦草 TN、TP 的积累量与水体中 TN、TP 总削减量成正比关系,而苦草去除污染物贡献率则与水体中 TN、TP 总削减量不构成关系。尽管苦草对水体中氮去除有一定贡献,但生态介质箱中的非植物因素对总氮去除的贡献远高于苦草对 N、P 的吸收作用。

表 2 不同级配方式对植物吸收 N、P 的影响

级配方式	TN 积累量/ (mg·g ⁻¹)	水体中 TN 总削减量/mg	苦草对水中 TN 去除的贡献率/%	TP 积累量/ (mg·g ⁻¹)	水体中 TP 总削减量/mg	苦草对水中 TP 去除的贡献率/%
植物组	18.48±2.64c	440	23.52±3.36a	6.24±0.78c	116	30.12±3.77c
正级配组	29.19±2.32b	890	17.05±1.36c	13.98±0.96a	320	22.72±1.56a
反级配组	37.86±3.84a	1054	18.68±1.89b	9.80±0.71b	281	18.14±1.31b

3 讨论

3.1 生态介质箱的不同级配方式对模拟废水的净化效果比较

生态介质箱作为一种综合治理技术,其综合沉水植物(苦草)、基质(沸石、陶粒、活性炭)和微生物为一体,能有效去除各类污染物。本试验设计 2 组复合型正、反级配生态介质箱(正级配组和反级配组)、2 组单一型生态介质箱(基质组和植物组)和对照组(空白组)。其中,含有基质的生态介质箱(正级配组、反级配组和基质组)使水体的 pH 上升且呈碱性,基质包含的沸石与陶粒中含有碱金属或碱土金属,经水溶液浸泡后产生 OH⁻,而植物也是影响水体 pH 的次要因素,受水体中碳酸盐平衡系统(CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃ ↔ H⁺ + HCO₃⁻ ↔ 2H⁺ + CO₃²⁻),苦草吸收水中的 CO₂ 进行光合作用,使水中的 CO₂ 浓度降低,破坏水体中 H₂CO₃ 原有的平衡,从而导致 pH 的略

微上升^[8],这与张来甲等^[9]的研究结果一致。

水体中磷元素通过沉水植物根茎叶的吸收与同化作用^[10]、基质吸附^[11]、沉降作用^[12-13]和微生物代谢^[14]等作用来去除,其中基质的吸附与沉降在磷素的去除和固定机制中可能发挥最重要的作用^[15],基质中含有 Ca²⁺、Mg²⁺和 Al³⁺等离子与磷酸盐产生固相沉淀,且植物本身在除磷方面较弱^[16],因此各组对磷的去除存在显著性差异。对于正级配组与反级配组,由于上层基质通过透水孔充分接触水体,更好地发挥其吸附能力,有研究^[17]表明,活性炭的除磷能力要优于沸石。因此,正级配组的除磷能力大于反级配组。

水体中氮素主要通过植物吸收与同化^[18-20]、基质吸附^[21]、微生物的硝化与反硝化等作用^[13]以及 NH₄⁺—N 的挥发^[22]来去除。基质不仅有吸附作用,也能为微生物的生长提供载体并能影响其代谢作用^[23],而植物组仅通过苦草根茎叶的吸收同化作用

与附着在苦草上的生物膜作用来去除氮素,由于净化形式单一,以及温度等原因限制植物的代谢作用^[24],因此各组对氮的去除存在显著性差异。反级配组对N素的去除能力优于正级配组,其原因在于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的差异,沸石的去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 优于活性炭^[25]。

水体中的 COD_{Mn} 主要通过植物的根系吸收、吸附、植物根际和基质中微生物的分解代谢作用而被降解去除^[26-27],植物与基质均能提高微生物富集,形成微生物强化净化区,富集的微生物是净化水体中 COD_{Mn} 的主体^[13],使得4组试验组的 COD_{Mn} 去除率无显著差异。

3.2 生态介质箱的不同级配方式对植物生长及N、P积累量的比较

株高株重能直观地表现植株的生长状况,基质的不同级配方式可影响植物对N、P的吸收与利用,并对植株有一定的胁迫,从而影响植株的生长发育。正级配组与反级配组中的各层基质与苦草有一定的胁迫关系,且基质会挤压苦草,对苦草的生长发育有一定的阻碍影响;基质的不同级配方式还影响着苦草对水体中TN与TP的吸收,生态介质箱中的非植物因素对TN、TP去除的贡献远高于苦草对N、P的吸收作用,这可能是苦草根茎叶与基质表面提供微生物生长的场所,微生物硝化作用^[28]、微生物的富集^[29]以及基质的吸附等非植物因素使得N、P浓度下降。因此,优化生态介质箱的结构,改进植物的种植方式以强化微生物和植物的作用可以促进对TN和TP的修复效果。综上所述,生态介质箱可针对去除不同污染物的目的调节其级配方式,以满足存在不同污染程度的水体,且可优化生态介质箱的结构,改进植物的种植方式以强化微生物和植物的作用,提高生态介质箱的净化能力。

4 结论

(1)基质组型的生态介质箱使水体呈碱性,植物组型的生态介质箱使水体呈中性。正、反级配型的2种级配方式对水体pH的影响与 COD_{Mn} 的去除效果并无显著性差异,而各试验组对TP、TN和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果呈显著性差异,其中反级配组对TN和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除效果优于正级配组,正级配组对TP的去除效果优于反级配组。

(2)植有苦草的3个试验组中直接植入河泥最适于苦草生长,而正反级配组型虽能使苦草生长,但生长状况不理想,且2组的苦草生长存在显著性差异,其中反级配组的苦草长势优于正级配组。

(3)苦草对N、P有一定的积累能力,其中植物组对

水体中TN和TP的积累量最低,而对水体中TN和TP的去除贡献率最高。正反级配型的2种级配方式对水体中TN和TP的积累量呈显著性差异,其中反级配组对TN的积累量与贡献率均大于正级配组,正级配组对TP的积累量与贡献率大于反级配组。

参考文献:

- [1] 郭炜超,徐斌,王趁义,等.黑臭河水体治理技术的研究现状与进展[J].水处理技术,2018,44(8):1-5.
- [2] He D F, Chen R R, Zhu E H, et al. Toxicity bioassays for water from black-odor rivers in Wenzhou, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(3): 1731-1742.
- [3] 黄丽芬,张蓉,余俊,等.弱光下氮素配施对杂交水稻氮磷钾吸收分配的效应研究[J].核农学报,2014,28(12): 2261-2268.
- [4] 王趁义,赵欣园,藤丽华,等.碱蓬浮床对海水养殖尾水中氮磷修复效果研究[J].广西植物,2018,38(6):696-703.
- [5] 张翔凌.不同基质对垂直流人工湿地处理效果及堵塞影响研究[D].武汉:中国科学院水生生物研究所,2007.
- [6] Dong H, Qiang Z, Li T, et al. Effect of artificial aeration on the performance of vertical-flow constructed wetland treating heavily polluted river water[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(4): 596-601.
- [7] 朱文博,王洪秀,柳翠,等.河道曝气提升河流水质的WASP模型研究[J].环境科学,2015,36(4):1326-1331.
- [8] 苏发文,高鹏程,来琦芳,等.铜绿微囊藻和小球藻对水环境pH的影响[J].中国水产科学,2016,23(6):1380-1388.
- [9] 张来甲,叶春,李春华,等.不同生物量苦草在生命周期的不同阶段对水体水质的影响[J].中国环境科学,2013,33(11):2053-2061.
- [10] 樊恒亮,谢丽强,宋晓梅,等.沉水植物对水体营养的响应及氮磷积累特征[J].环境科学与技术,2017,40(3): 42-48.
- [11] 唐朝春,刘名,陈惠民,等.吸附除磷技术的研究进展[J].水处理技术,2014,40(9):1-7.
- [12] Wang Z, Dong J, Liu L, et al. Study of oyster shell as a potential substrate for constructed wetlands[J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2013, 67(10): 2265-2272.
- [13] 胡杰,王晓俊,王趁义,等.碱蓬浮床对海水养殖尾水的修复效果[J].水土保持通报,2018,38(2):281-284.
- [14] 魏儒平,闫诚,杨欣妍,等.强化生物除磷系统的功能微生物研究进展[J].生物技术通报,2017,33(10):1-8.
- [15] 武俊梅,张翔凌,王荣,等.垂直流人工湿地系统基质优化级配研究[J].环境科学,2010,31(5):1227-1232.
- [16] 王丽莎,李希,甘蕾,等.亚热带丘陵区湿地水生植物组

- 合模式拦截氮磷的研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9):1577-1583.
- [17] 张修稳, 李锋民, 卢伦, 等. 10 种人工湿地填料对磷的吸附特性比较[J]. 水处理技术, 2014, 40(3):49-52.
- [18] Bartucca M L, Mimmo T, Cesco S, et al. Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system[J]. Science of the Total Environment, 2016, 542:803-808.
- [19] Guo Y, Liu Y, Zeng G, et al. A restoration-promoting integrated floating bed and its experimental performance in eutrophication remediation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5):1090-1098.
- [20] 胡绵好, 奥岩松, 杨肖娥, 等. 不同 N 水平的富营养化水体中经济植物净化能力比较研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2):147-150.
- [21] Li F M, Lu L, Zheng X, et al. Three-stage horizontal sub-surface flow constructed wetlands for organics and nitrogen removal: Effect of aeration[J]. Ecological Engineering, 2014, 68(1):90-96.
- [22] 刘波, 王文林, 凌芬, 等. 曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟[J]. 生态学报, 2012, 32(23):7270-7279.
- [23] Lee S, Maniquiz-Redillas M C, Kim L H. Setting basin design in a constructed wetland using TSS removal efficiency and hydraulic retention time[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(9):1791-1796.
- [24] 张嵘梅, 马博馨, 杨志杰, 等. 沉水植物苦草属在水体环境修复中的研究进展和应用现状[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28):144-154.
- [25] 孙鸿, 杨斌武, 韩加寿, 等. 沸石和活性炭处理氨氮废水的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(61):289-291.
- [26] Fried A, McKeen S, Sewell S, et al. Photochemistry of formaldehyde during the 1993 tropospheric OH photochemistry experiment[J]. Journal of Eophysical Research, 1997, 102(5):6283-6296.
- [27] 周玥, 韩玉国, 张梦, 等. 4 种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10):3353-3360.
- [28] He S B, Gao J W, Chen X C, et al. Nitrogen removal in micro-polluted surface water by the combined process of bio-filter and ecological gravel bed[J]. Water Science and Technology, 2013, 67(10):2356-2362.
- [29] 黄永芳, 杨秋艳, 张太平, 等. 水培条件下两种植物根系分泌特征及其与污染物去除的关系[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):373-379.
- (上接第 355 页)
- [27] Wan Y N, Yu Y, Wang Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: Influence of different forms of selenium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 133:127-134.
- [28] Wu Z L, Yin X B, Banuelos G S, et al. Indications of selenium protection against cadmium and lead toxicity in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1-7.
- [29] Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235:343-351.
- [30] Saidi I. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, 171(5):85-91.
- [31] Schützendubel A, Schwanz P, Teichmann T, et al. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots[J]. Plant Physiology, 2001, 127(3):887-898.
- [32] 庞晓辰, 王辉, 吴泽赢, 等. 硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1679-1685.
- [33] Dutilleul C, Jourdain A, Bourguignon J, et al. The Arabidopsis putative selenium-binding protein family: Expression study and characterization of SBP1 as a potential new player in cadmium detoxification processes [J]. Plant physiology, 2008, 147(1):239-251.
- [34] 陈雪龙, 王晓龙, 齐艳萍. 大庆龙凤湿地土壤理化性质与硒元素分布关系研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4):159-162.