

聚丙烯酰胺和椰糠配合对绿地土壤换填介质渗、蓄、净的效果

马笑¹, 王晨光², 郝珊², 甘旭³, 张阿凤², 王旭东²

1. 陕西省西咸新区沣西新城海绵城市技术中心, 咸阳 712000
2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 杨陵 712100
3. 陕西省西咸新区沣西新城管理委员会, 咸阳 712000

摘要: 绿地土壤换填介质性能对海绵城市雨水径流源头削减起着至关重要的作用。为解决西咸新区海绵城市绿地土壤换填介质(土:沙:椰糠=4:4:2, 体积比)去污性能不佳和椰糠遇水漂浮的问题, 通过设置不同质量浓度(0.00%、0.50%、0.75%、1.00%、1.50%)的聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)溶液与换填介质进行混合, 测定其饱和导水率、饱和含水量、全氮(TN)、全磷(TP)、化学需氧量(COD)以及重金属铜(Cu)、锌(Zn)和镉(Cd)静态吸附效果。结果表明: 与不添加PAM处理相比, 用量为0.75%、1.00%、1.50%(质量分数)的PAM处理, 介质的容重分别显著降低了9.1%、10.8%、12.2%; 用量为1.00%、1.50%的PAM处理, 介质的饱和含水量分别显著增加了24.3%、30.0%; 用量为1.50%的PAM处理, 介质的饱和导水率显著提高了52.6%; 不同处理对TN和COD的吸附效果没有显著影响; 与对照相比, 用量为0.75%、1.00%、1.50%的PAM处理, 滤液中磷的含量分别显著增加了20.1%、31.3%、51.1%; PAM的添加增加了介质对Cu、Zn和Cd的吸附。总之, 用量为1.50%的PAM处理对于介质容重、饱和含水量、饱和导水率及对污染物(TN、COD、Cu、Zn、Cd)的静态吸附效果方面表现最优, 因此推荐1.50%的PAM与土:沙:椰糠(4:4:2)配合可作为西咸新区绿地土壤换填介质。

关键词: 聚丙烯酰胺; 椰糠; 换填介质; 物理性状; 污染物去除率

Effects of polyacrylamide and coir on the media infiltration, retention and purification in urban greenland soils

MA Xiao¹, WANG Chenguang², HAO Shan², GAN Xu³, ZHANG Afeng², WANG Xudong²

1. Sponge City Technology Center, Fengxi New Town, Xixian New District, Xianyang 712000, China
2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
3. Fengxi New City of Xixian New Area Administration of Shaanxi Province, Xianyang 712000, China

Abstract: Background, aim, and scope Bioretention, a promising technology for urban stormwater pollution treatment. The mixture of soil, sand and coir was recommended to use as a bioretention media in the sponge city of the Fengxi New Town. The media amelioration was significantly enhanced soil infiltration, however, there

收稿日期: 2019-03-22; 录用日期: 2019-07-26; 网络出版: 2019-08-05

Received Date: 2019-03-22; Accepted Date: 2019-07-26; Online first: 2019-08-05

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2017ZDXM-SF-083)

Foundation Item: Key Research and Development Program of Shaanxi (2017ZDXM-SF-083)

通信作者: 甘旭, E-mail: fzhmyj@163.com

Corresponding Author: GAN Xu, E-mail: fzhmyj@163.com

引用格式: 马笑, 王晨光, 郝珊, 等. 2020. 聚丙烯酰胺和椰糠配合对绿地土壤换填介质渗、蓄、净的效果[J]. 地球环境学报, 11(1): 112-118.

Citation: Ma X, Wang C G, Hao S, et al. 2020. Effects of polyacrylamide and coir on the media infiltration, retention and purification in urban greenland soils [J]. Journal of Earth Environment, 11(1): 112-118.

were still problems on soil purification and the coir was floating with the stormwater. In order to improve the current situation, this study mixed PAM with the soil, sand and coir (the volume ratio is 4 : 4 : 2), to investigate the effects of different dosages of PAM on saturated water content, saturated water conductivity and pollutant removal rate. **Materials and methods** The emulsive PAM with different dosages (0.00%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.50%) (w/w) were mixed with the soil, sand and coir (the volume ratio is 4 : 4 : 2), which was incubated at laboratory lasted 20 days, the medium water content kept at 15% during the incubation study. And then saturated water conductivity, water content and chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), copper, zinc and cadmium contents in different leachates were measured to evaluate the pollution removal rate. **Results** The ratio of different amount of PAM and coconut chaff was important to improve the physical and chemical properties of the filter media. Compared with the control, the medium bulk density was decreased by 9.1%, 10.8% and 12.2% under PAM amendment at 0.75%, 1.00% and 1.50%, respectively. The saturated water content and saturated water conductivity were increased by 30.0% and 52.6% under PAM amendment at 1.50% treatment, respectively. However, there was no significant difference between other treatments and the control. Compared to the control, the content of COD and total nitrogen of the leachate was no significant under PAM amendment. However, the content of phosphorus of the leachate increased by 20.1%, 31.3% and 51.1% under PAM amendment at 0.75%, 1.00% and 1.50%, respectively. The addition of PAM increases the removal rate of Zn, Cu and Cd. **Discussion** PAM can effectively improve soil structure, reduce soil bulk density, increase the total soil porosity and capillary porosity, maintain the stability of soil particles and pore structure, thereby increasing soil infiltration rate and soil moisture content. PAM directly affects the adsorption of pollutants by the media through its molecular structure, and indirectly affects the adsorption of pollutants by the media through the effect on soil structure. Application of PAM can influence on soil physical and chemical properties, and the changes depended on the emulsive PAM rate. **Conclusions** The mixture of soil, sand, coir (4 : 4 : 2 (v : v : v)) and with PAM (1.50% (w/w)) amendment was recommended to use as a soil amelioration in the sponge city of the Fengxi New Town. **Recommendations and perspectives** We should be based on the actual situation of the soil, and comprehensively consider the effects of the infiltration, retention and purification, in order to select a suitable replacement media for the local.

Key words: polyacrylamide; coir; soil amelioration; physical properties; pollutant removal rate

随着城镇化进程的加快, 由此带来的弊端也日益凸显, 如城市内涝、水资源短缺、水污染比较严重。海绵城市是指城市能够像海绵一样, 在应对城市内涝、净化水资源等方面具有良好的功能, 并达到“自然积存”、“自然渗透”、“自然净化”的目的(崔广柏等, 2016)。土壤介质是海绵设施功能发挥的重要载体。土壤本身特别是黏质土壤很难达到海绵设施渗滤介质“下渗”和“净污”的要求(高晓丽, 2014)。换填介质作为海绵设施的重要组成部分可以有效平衡保水与下渗这对矛盾体, 同时, 设施中合理的植物搭配会促进其渗透、滞蓄和净化功能, 因此选择合适的土壤换填介质对源头减排项目实施有效性起着关键作用。换填介质是在原土性状的基础上, 合理选择其他透水、保水、去污等功能较强的介

质填料与原土按照一定比例进行混合, 综合改良原土下渗能力弱或保水性能差等不良性状, 既能保证不失去原土供养植物生长的能力, 又可加速雨水下渗, 实现自然积存、自然渗透、自然净化的城市发展方式。目前换填介质的主要配比是以土壤为基础, 同时添加一定有机物料(孟莹莹等, 2010)。国外对于换填介质已做了相应的规范, 并对不同的物料进行量化配比, 如: 北卡罗来纳州推荐使用 85%—88% 的沙、8%—12% 的黏土和粉沙、3%—5% 的有机质且成本相对较低(Hunt and Lord, 2006); 特拉华州推荐使用 1/3 的沙、1/3 的泥炭、1/3 的有机物料进行混合, 但是价格相对较高(DNREC, 2005); 也有推荐使用 80% 的沙壤土、10% 的蛭石、10% 的珍珠岩作为换填介质(Bratieres et al, 2008)。目前不同的填料对

于雨水污染物的去除效果有较大的差异。

聚丙烯酰胺 (polyacrylamide, PAM) 是由丙烯酰胺 (acrylamide, AM) 经聚合而合成的水溶性线性高分子聚合物, 具有良好的絮凝性, 喷施或撒于地表能提升土壤水分的入渗 (Yu et al, 2003), 改良土壤结构并能促进土壤团聚体的形成, 同时减少土壤养分流失 (李晶晶等, 2016)。椰糠是椰子壳外层纤维, 具有较好的入渗和排水性能, 由于这两种填料具有改善土壤结构的特性, 所以将二者结合起来 (相宗国等, 2012; 孙建磊等, 2016)。西咸新区沣西新城是 2015 年 4 月入选全国首批海绵城市建设试点, 由于土壤质地为粉黏土, 对于雨水的下渗、净化作用差, 不宜直接作为海绵设施渗滤介质, 通过系列渗透及保水性能实验, 提出土:沙:椰糠 (体积比 4:4:2) 为换填介质应用配比, 其稳定下渗速率可达到 $1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 但是椰糠密度较轻, 与土壤和沙的密度差值较大, 在运行初期, 设施蓄水后大量椰糠上浮, 影响换填介质的均匀性及下渗保水性能稳定性。为解决这一问题, 可选用 PAM 与换填介质进行混合, 改善换填介质中椰糠分散漂浮的现象。因此本研究以西咸新区当下应用的换填介质为研究对象, 添加一定用量的 PAM, 探究不同用量的 PAM 添加对换填介质容重、饱和含水量、饱和导水率、以及对污染物去除效果的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

椰糠购于斯里兰卡, 容重为 $0.116 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 总孔隙度为 55.95%, pH 值为 5.24, 有机质含量为 $908.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。聚丙烯酰胺 (PAM): 分析纯, 分子量 500 万以上, 水解度 $\leq 30\%$, 固体含量 $\geq 90\%$, 购买于天津市科密欧化学试剂有限公司。供试土壤采自西咸新区沣西新城区域土壤, 质地为黏壤土, 容重为 $1.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 孔隙度为 44.2%, 饱和导水率为 $22.2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。试验选用沙料的平均粒径为 0.35 mm。

1.2 试验设计及样品采集

室外培养试验在西北农林科技大学旱棚内进行, 在土:沙:椰糠 (体积比 4:4:2) 的基础上, 分别添加质量浓度为 0.00%、0.50%、0.75%、1.00%、1.50% 的 PAM (分别记为处理 A1、A2、A3、A4、A5), 共计 5 个处理, 每个处理重复 3 次。

具体步骤为先将土、沙和椰糠三者按照 4:4:2 的体积比混匀, 然后边加溶胶态的 PAM 边混匀, 将混合好的 1010 g 介质放在口径 13.5 cm、高 9 cm 塑料盒中培养, 培养期保持介质湿度为总干重的 25%, 每隔 1—2 d 称重、浇水用于控制水分含量, 共培养 20 d。培养结束后, 用环刀采取培养盒内的介质, 带回实验室内测定不同配比介质的饱和导水率、饱和含水量。在砸入环刀的附近取土带回实验室内测初始含水率以计算容重。塑料盒内剩余介质用四分法一半储存于 4℃ 冰箱中, 另一半自然风干, 过 2 mm 筛, 装袋备用。

静态吸附试验: 准确称取 2.5 g 培养后过 2 mm 筛的风干介质于 50 mL 离心管中, 按照水土比 10:1 添加 25 mL 人工配置的污水 (表 1)。在 25℃ 恒温、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 频率下震荡 16 h, 以 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度离心 10 min, 之后过滤, 测定不同处理滤液中化学需氧量 (COD)、全氮、全磷、铜、锌、镉的含量。其中重金属去除率 (%) = (进水重金属浓度 - 滤液中重金属浓度) / 进水浓度 $\times 100\%$ 。

表 1 人工配制的雨水水质
Tab.1 Water quality of artificially prepared rainfall

指标 Item	浓度 Concentration/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	试剂 Reagent
全氮 Total nitrogen	8	硝酸钾 KNO_3
全磷 Total phosphorus	2	磷酸二氢钾 KH_2PO_4
化学需氧量 COD	300	葡萄糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$
铜 Cu	2.25	氯化铜 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
锌 Zn	30	硫酸锌 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
镉 Cd	1.5	氯化镉 $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

1.3 测定指标及方法

换填介质的容重、饱和导水率、饱和含水量按照土壤的测定方法进行。介质容重用环刀法测定: 环刀带回实验室后先进行称重, 记为 m_1 , 初始含水量记为 $W\%$, 环刀体积为 100 cm^3 , 则介质容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) = $m_1 / 100 \times (1 + W\%)$ 。介质饱和导水率采用室内环刀定水头法, 水头高控制在 5 cm。土壤饱和导水率是在饱和土壤中单位势梯度下单

位时间内通过土壤横截面积的水流体积, 可根据达西定律获得 (邵明安等, 2006):

$$K_s = \frac{Q}{A \cdot T}$$

式中: K_s 为单位梯度下的通量, 也即饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); Q 为出流量 (mL); A 为水流经过的横截面积 (cm^2); T 为出流时间 (min)。

用烘干法测定介质饱和含水量: 介质饱和导水率测完后, 称重, 记为 m_2 , 将环刀放入 105°C 烘箱烘干至恒重后称重, 记为 m_3 , 环刀质量事先已知为 m_0 , 介质饱和含水量 (%) = $(m_2 - m_3) / (m_3 - m_0) \times 100\%$ (鲍士旦, 2000)。

全磷用过硫酸钾消解 - 钼酸铵分光光度法; 全氮用碱性过硫酸钾消解 - 紫外分光光度法; COD 用快速密闭消解法; 铜、锌、镉用石墨炉 - 原子吸收分光光度方法测定。TN、TP、COD、Cu、Zn、Cd 检测方法参照国家标准《水和废水监测分析方法 (第四版)》。

1.4 数据分析

所有数据均采用 3 次重复, 采用 Microsoft Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 20 软件整理和分析数据, 用单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 和 Duncan's 法进行方差分析和多重比较 ($p < 0.05$), 将 3 次重复的平均值和标准差用 Origin 作图。

2 结果与分析

2.1 PAM 添加对介质容重、饱和导水率和饱和含水量的影响

PAM 的添加影响了介质容重、饱和含水量和饱和导水率 (图 1、图 2、图 3)。随着 PAM 的添加, 换填介质容重降低, 与不添加 PAM 对照处理相比, 用量为 0.75%、1.00% 和 1.50% 的 PAM 添加, 介质容重分别降低了 9.1%, 10.8% 和 12.2%, 而用量为 0.50% 的 PAM 处理与对照相比, 介质容重没有显著差异 (图 1)。PAM 表面有大量亲水基团, 吸水后通过氢键对黏粒吸附、凝聚, 有效促成中团粒凝聚成大团粒, 增加土壤大团聚体和水稳性团聚体的含量, 从而改善土壤结构 (员学锋等, 2005; 曹丽花等 2008; 康倍铭等, 2014), 使得换填介质变疏松, 增加介质空隙。这与陈方鑫等 (2016) 的研究结果一致, 秸秆复合 PAM 显著降低了土壤容重。用量为 1.50% 的 PAM 添加后介质

容重降低幅度最大, 对介质孔隙结构改善最明显。

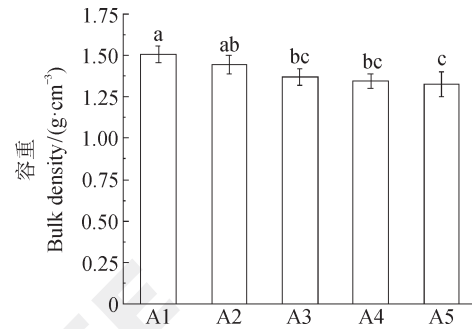


图 1 基质容重的变化

Fig.1 Bulk density of matrix under different treatments

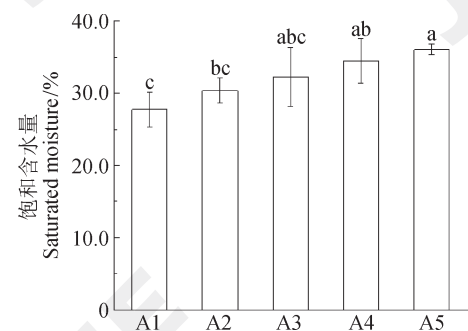


图 2 基质饱和含水量的变化

Fig.2 Saturated moisture of matrix under different treatments

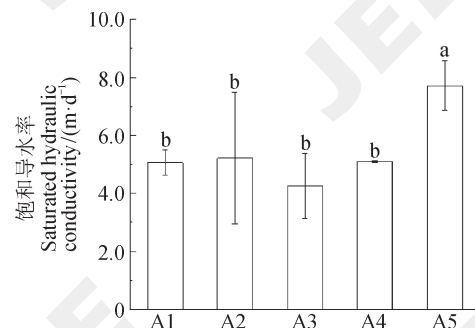


图 3 基质饱和导水率的变化

Fig.3 Saturated hydraulic conductivity of matrix under different treatments

由于 PAM 表面有大量的亲水基团, 因此添加 PAM 处理土壤的饱和含水量增加, 特别是用量为 1.00% 和 1.50% 的处理。与对照相比, 饱和含水量分别增加了 24.3% 和 30.0%, 而其他处理与对照相比没有显著差异 (图 2)。康倍铭等 (2014) 研究发现, 添加 0.1% PAM 与风化煤、秸秆和油渣的处理提高了土壤的保水性。这与介质的容重降低, 孔隙度增加有关 (图 1)。PAM 的添加也提高了介质的饱和导水率, 用量为 1.50% 的 PAM 处理,

与对照相比,介质的饱和导水率提高了 52.6%,而其他处理之间没有显著差异。由于 PAM 施用改善土壤结构,增加土壤孔隙度,解决了土壤保水和渗透之间的矛盾,但这种效果与 PAM 的用量有关(图 3)。韩凤朋等(2010)研究发现,PAM 的用量在 $2.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,土壤的饱和导水率达到最大,但是用量为 $3.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,降低了土壤饱和导水率。由于 PAM 本身的透水性能弱,且 PAM 遇水发生膨胀后,增加水的黏滞度,而溶于水后的 PAM 由颗粒状变为多枝的纤维状,从而进入土壤原有的空隙,阻塞渗透水入渗的路径,增加水流入渗的阻力,从而导致土壤的饱和导水率降低。因此在使用 PAM 时,应考虑 PAM 的用量,避免高用量的 PAM 对土壤水分入渗造成影响。综合不同质量浓度的 PAM 添加对介质饱和导水率和饱和含水量的影响,用量为 1.50% 的 PAM 添加对介质饱和含水量、饱和导水率的影响最佳。

2.2 不同用量的 PAM 添加对介质渗滤液中 COD、氮和磷含量的影响

不同用量的 PAM 添加对于换填介质渗滤液中的 COD 和全氮含量没有显著影响(图 4、图 5)。而 0.75%、1.00% 和 1.50% 的 PAM 处理与对照相比,渗滤液中磷的含量分别增加了 20.1%、31.3% 和 51.1%(图 6)。而员学锋等(2003)研究发现,PAM 添加减少土壤淋溶液中氮、磷和钾累积量,这与本试验中用的阴离子型 PAM 有关。贺春风等(2011)认为,阴离子型的 PAM 添加降低了沙质土壤对磷的最大吸附量,PAM 的阴离子基团与磷酸根存在竞争吸附位点,降低土壤对磷酸根的吸附;或者是 PAM 与土壤中的铁铝氧化物和黏粒形成有机-无机复合物,降低了活性铁铝氧化物对磷的吸附;PAM 的添加增加土壤团聚体中大粒径,减少 $<0.01 \text{ mm}$ 物理性黏粒含量,减少土壤颗粒表面对磷的吸附位点(王旭东和杨雪芹,2006;付海曼和贾黎明,2009)。PAM 施用对于不同处理滤液中 COD、TN 含量没有显著性的影响,而用量为 0.75%、1.00% 和 1.50% 的 PAM 处理,显著增加介质渗滤液中磷的含量,但是都低于进水浓度。

2.3 不同用量的 PAM 添加对介质 Zn、Cu、Cd 去除率的影响

由表 2 可以看出,椰糠本身对 Zn、Cu、Cd 具有很好的去除效果,而不同用量的 PAM 添加与对照相比,增加了对 Zn、Cu、Cd 的去除效果。不同

浓度的 PAM 添加,Zn、Cu、Cd 的去除率分别到达 99.83%—99.88%、100.2%—100.5%、101.2%。这与前人的研究结果一致,PAM 溶于水后羧基、酰胺基 2 种活性基团与金属离子形成配位键或氢键(Ruehrwein and Ward, 1952),且对于 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 的吸附在弱酸性的条件下优于在强酸和碱性条件下(孟繁健等,2018)。阴离子型的 PAM 对重金属的作用机理主要是通过吸附架桥、联合吸附、PAM 作为基底、配位作用等这几个方面,同时减低重金属在土壤中的暴露风险(孟繁健等,2018)。

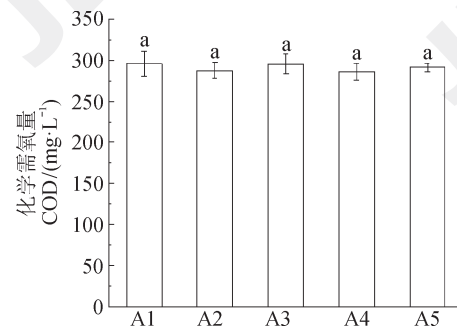


图 4 基质渗滤液中 COD 含量的变化
Fig.4 COD content of matrix under different treatments

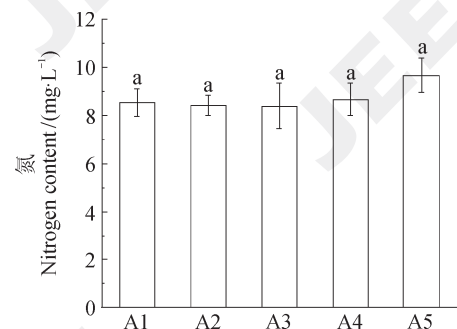


图 5 基质渗滤液中氮含量的变化
Fig.5 Nitrogen content of matrix under different treatments

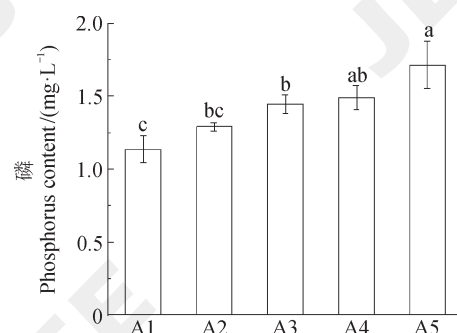


图 6 基质渗滤液中磷含量的变化
Fig.6 Phosphorus content of matrix under different treatments

不同处理对污染物的去除效果达到了城市污水再生利用景观环境用水水质的标准 (GB/T 18921—2002)。与标准相比, 各处理滤液中 Cu 的浓度降低 98.4%—101.2%, Zn 的浓度降低

87%—98.2%, Cd 的浓度降低 121.6%—136.9%。与对照相比, PAM 添加后介质对 Zn、Cu、Cd 的吸附效果显著增强, 但不同用量的 PAM 处理对介质吸附 Zn、Cu、Cd 的影响效果不显著。

表 2 不同处理对 Zn、Cu、Cd 去除率的影响
Tab.2 Pollutant removal rate of different treatments

处理 Treatment	Zn 去除率 Removal rate of Zn/%	Cu 去除率 Removal rate of Cu/%	Cd 去除率 Removal rate of Cd/%	Cu/%	Zn/%	Cd/%
0.00% PAM	99.13±0.551 b	99.27±1.084 b	100.7±0.410 b	-98.4	-87.0	-121.6
0.50% PAM	99.88±0.023 a	100.5±0.102 a	101.2±0.117 a	-101.2	-98.2	-136.9
0.75% PAM	99.83±0.113 a	100.3±0.180 a	101.2±0.075 a	-100.7	-97.5	-136.5
1.00% PAM	99.83±0.079 a	100.5±0.333 a	101.2±0.142 a	-101.1	-97.4	-135.9
1.50% PAM	99.84±0.069 a	100.2±0.209 a	101.2±0.127 a	-100.5	-97.6	-135.4

后三列值表示滤液中的浓度低于城市污水再生利用景观环境用水水质标准 (GB/T 18921—2002) 的百分数。

The values in the last three columns indicate the percentage of the concentration in the filtrate that is lower than the water quality standard for urban landscape recycling and environmental water (GB/T 18921—2002).

3 结论

不同用量的 PAM 与椰糠配比对于基质理化性质的改善有重要的作用。特别是用量为 1.50% 的 PAM 添加对降低土壤容重, 增加土壤饱和含水量和饱和导水率有重要的影响。但是不同用量的 PAM 添加对于基质渗滤液中的 COD 和全氮含量没有显著性的影响, 且用量为 0.75%, 1.00% 和 1.50% 的 PAM 处理增加了渗滤液中磷的含量。但 PAM 的添加增加了 Zn、Cu、Cd 去除率, 并且不同处理对污染物的去除效果达到了城市污水再生利用景观环境用水的水质标准。

参考文献

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析 [M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社. [Bao S D. 2000. Soil agricultural chemistry analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Press.]

曹丽花, 赵世伟, 梁向锋, 等. 2008. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究 [J]. 农业工程学报, 24(1): 45—49. [Cao L H, Zhao S W, Liang X F, et al. 2008. Improvement effects of PAM on soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 24(1): 45—49.]

陈方鑫, 卢少勇, 冯传平. 2016. 农业秸秆复合 PAM 对湖滨带土壤改良效果的研究 [J]. 农业环境科学学报, 35(4): 711—718. [Chen F X, Lu S Y, Feng C P. 2016. Improvements of soil in lakeside zones using combined

crop straw and PAM [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 35(4): 711—718.]

崔广柏, 张其成, 湛忠宇, 等. 2016. 海绵城市建设研究进展与若干问题探讨 [J]. 水资源保护, 32(2): 1—4. [Cui G B, Zhang Q C, Zhan Z Y, et al. 2016. Research progress and discussion of sponge City construction [J]. *Water Resources Protection*, 32(2): 1—4.]

付海曼, 贾黎明. 2009. 土壤对氮、磷吸附/解吸特性研究进展 [J]. 中国农学通报, 25(21): 198—203. [Fu H M, Jia L M. 2009. Study progress of nitrogen and phosphate adsorption and desorption in soils [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25(21): 198—203.]

韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 等. 2010. PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响 [J]. 农业工程学报, 26(4): 70—74. [Han F P, Zheng J Y, Li Z B, et al. 2010. Effect of PAM on soil physical properties and water distribution [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(4): 70—74.]

贺春风, 杨巍, 王永敏, 等. 2011. 秸秆-膨润土-PAM 改良材料对沙质土壤磷素吸附解吸的影响 [J]. 中国农学通报, 27(33): 79—84. [He C F, Yang W, Wang Y M, et al. 2011. Effect of straw-bentonite-PAM improved material on phosphorus adsorption-desorption of sandy soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(33): 79—84.]

康倍铭, 徐健, 吴淑芳, 等. 2014. PAM 与天然土壤改良材料混合对部分土壤理化性质的影响 [J]. 水土保持研究, 21(3): 68—72, 78. [Kang B M, Xu J, Wu S F, et al. 2014. Effect of combination of polyacrylamide (PAM)

- and natural improvement material on some soil physical and chemical properties [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 21(3): 68–72, 78.]
- 李晶晶, 邹超煜, 白岗栓. 2016. 聚丙烯酰胺对坡地苹果园水土流失和土壤养分流失的影响 [J]. *应用生态学报*, 27(9): 2991–2999. [Li J J, Zou C Y, Bai G S. 2016. Effects of polyacrylamide on soil erosion and soil nutrient loss in sloped apple orchards [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(9): 2991–2999.]
- 孟繁健, 朱宇恩, 孟凡旭, 等. 2018. PAM 在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展 [J]. *中国农学通报*, 34(16): 92–99. [Meng F J, Zhu Y E, Meng F X, et al. 2018. The role and mechanism of PAM in phytoremediation of heavy metal polluted soil: a review [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 34(16): 92–99.]
- 孟莹莹, 陈建刚, 张书函. 2010. 生物滞留技术研究现状及应用的重要问题探讨 [J]. *中国给水排水*, 26(24): 20–24, 38. [Meng Y Y, Chen J G, Zhang S H. 2010. Research status of bioretention technology and discussion on key problems in its domestic application [J]. *China Water & Wastewater*, 26(24): 20–24, 38.]
- 孙建磊, 吕晓惠, 赵西, 等. 2016. 椰糠与蛭石不同配比对番茄穴盘苗生长的影响 [J]. *中国蔬菜*, (5): 45–48. [Sun J L, Lü X H, Zhao X, et al. 2016. Effect of different coconut coir and vermiculite substrate ratio on growth indexes of tomato plug seedlings [J]. *China Vegetables*, (5): 45–48.]
- 邵明安, 王全九, 黄明斌. 2006. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社: 70–96. [Shao M A, Wang Q J, Huang M B. 2006. Soil physics [M]. Beijing: Higher Education Press: 70–96.]
- 王旭东, 杨雪芹. 2006. 聚丙烯酰胺对磷素在土壤中吸附-解析与迁移的影响 [J]. *环境科学学报*, 26(2): 300–305. [Wang X D, Yang X Q. 2006. Effect of polyacrylamide on phosphorus adsorption, desorption and translocation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 26(2): 300–305.]
- 相宗国, 赵瑞, 陈俊琴. 2012. 不同粉碎度的椰糠基质对黄瓜穴盘苗生长发育及其质量的影响 [J]. *中国蔬菜*, (14): 65–69. [Xiang Z G, Zhao R, Chen J Q. 2012. Effect of different grinding degrees of coconut coir substrate on growth and quality of cucumber plug seedlings [J]. *China Vegetables*, (14): 65–69.]
- 员学锋, 汪有科, 吴普特, 等. 2005. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析 [J]. *水土保持学报*, 19(2): 37–40. [Yun X F, Wang Y K, Wu P T, et al. 2005. Effects and mechanism of PAM on soil physical characteristics [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19(2): 37–40.]
- 员学锋, 吴普特, 汪有科, 等. 2003. 施加 PAM 条件下土壤养分淋溶试验研究 [J]. *水土保持通报*, 23(2): 26–28. [Yun X F, Wu P T, Wang Y K, et al. 2003. A study on effect of PAM on eluviations of soil nutrient [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 23(2): 26–28.]
- Bratieres K, Fletcher T D, Deletic A, et al. 2008. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: a large-scale design optimisation study [J]. *Water Research*, 42(14): 3930–3940.
- DNREC. 2005. Green technology: the Delaware urban runoff management approach [M]. Dover: Delaware Department of Natural Resources and Environmental Control, Division of Soil and Water Conservation.
- Hunt W E, Lord W G. 2006. Bioretention performance, design, construction, and maintenance [M]. Raleigh: North Carolina Cooperative Extension.
- Ruehrwein R A, Ward D W. 1952. Mechanism of clay aggregation by polyelectrolytes [J]. *Soil Science*, 73(6): 485–492.
- Yu J, Lei T, Shainberg I, et al. 2003. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2): 630–636.