

添加 PAM 对城市绿地换填介质性质的影响

王晨光¹, 郝珊¹, 陆思旭¹, 张阿凤¹, 王旭东¹, 马笑², 马越²

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2.陕西省西咸新区沣西新城海绵城市技术中心, 陕西 咸阳 712000)

摘要:以土+砂+腐熟秸秆(SSJ)以及土+砂+生物质炭(SSS)为城市绿地换填介质,研究其在添加 PAM 质量浓度为 0~1.5%时的理化性质变化,探寻 PAM 的适宜用量,以期在城市绿地土壤换填提供一定的理论和技术支撑。结果表明:添加 PAM 能够降低换填介质的容重,提高其饱和导水率和饱和含水量,且容重和饱和导水率随 PAM 用量的变化可以用二次曲线来描述。当 PAM 用量为 1.5%时,换填介质的饱和导水率较 PAM 用量为 1.0%时有下降的趋势,而容重则有上升的趋势。添加 PAM 可降低介质的 COD 解吸量。SSJ 换填介质随 PAM 用量的增加,其氮、磷解吸量表现出增加趋势,而 SSS 换填介质随 PAM 用量的增加其氮、磷解吸量呈现出先减小后增大的变化趋势。综合来看,在 PAM 添加浓度为 0~1.5%时,SSS 介质优于 SSJ 介质。PAM 在用量为 1.0%时可以最大程度提高介质的保水和导水能力,降低 COD 解吸量。

关键词:城市绿地; PAM; 换填介质; 腐熟秸秆; 生物质炭

中图分类号:S156.99

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)03-0356-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.051

Effect of PAM Amendment on the Properties of Urban Green Space Replacement Media

WANG Chenguang¹, HAO Shan¹, LU Sixu¹, ZHANG Afeng¹, WANG Xudong¹, MA Xiao², MA Yue²

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.Sponge City Technology Center, Fengxi New Town, Xixian New District, Xianyang, Shaanxi 712000)

Abstract: In this experiment, soil mixed with sand and composted straw (SSJ) and soil mixed with sand and biochar (SSS) were used as the replacement media for urban green space to explore their changes in physical and chemical properties after adding PAM with concentration of 0~1.5%. The suitable dosage of PAM was expected to be found to provide theoretical and technical support for soil refilling in urban green space. The results showed that adding PAM could reduce the bulk density of the media, and increase the saturated hydraulic conductivity and saturated water content. The change trend of bulk density and saturated hydraulic conductivity with the increasing of PAM could be described by a quadratic curve. However, when the PAM dosage was 1.5%, the saturated hydraulic conductivity showed a tendency to decrease compared with the PAM dosage of 1.0%. Whereas the bulk density showed an upward trend. The application of PAM could reduce COD desorption quantity of the media. With the increasing of PAM dosage, the nitrogen and phosphorus desorption of SSJ media showed an increase trend, while the nitrogen and phosphorus desorption of SSS media decreased first and then increased. On the whole, the SSS media was superior to the SSJ media when the PAM concentration was 0~1.5%. When the dosage of PAM was 1.0%, it could improve the water retention and water conductivity capacity of media to the greatest extent, and reduce COD desorption.

Keywords: urban green space; PAM; replacement media; composted straw; biochar

城市绿地在城市生态系统中具有削减道路径流^[1]、涵养水源的作用,但由于人为活动的影响,致使土壤质量遭到严重破坏,不利于植物生长,渗水、蓄水能力较差。利用改良材料对土壤进行改良是提高土

壤渗水、蓄水能力的有效手段。Mylavarapu 等^[2]、Naeini 等^[3]研究发现,有机肥可以提高土壤养分含量尤其是显著增加土壤中碳、氮含量,增强土壤的保水能力和降低土壤容重;Oguntunde 等^[4]试验结果表

收稿日期:2019-10-08

资助项目:西咸新区海绵城市绿地土壤换填介质应用技术研究项目(2017ZDXM-SF-083)

第一作者:王晨光(1994—),男,硕士,主要从事土壤化学研究。E-mail:15129656512@163.com

通信作者:王旭东(1965—),教授,主要从事土壤化学研究。E-mail: wangxudong01@126.com

张阿凤,副教授,主要从事生物质炭农田应用研究。E-mail:hangafeng@nawafu.edu.cn

明,添加生物质炭处理的土壤孔隙度较对照(CK)增加了 5%。生物质炭的这种特殊功能在砂质土壤上效果更显著,研究^[5]表明在砂质土壤中添加 25% 的生物质炭可以使土壤含水量高出对照 370%。PAM 是目前土壤改良中常用的土壤结构改良剂之一。但是目前关于 PAM 对土壤改良的效果说法不一,王全九等^[6]研究发现,施加 PAM 后会降低土壤入渗速率;而于建等^[7]研究表明,施加 PAM 后可以增加土壤入渗率;韩凤朋等^[8]发现,添加 PAM 会增加土壤饱和导水率,降低土壤容重,但 PAM 用量超过 2.0 g/m²时,会起到相反的效果。单一材料对土壤的改良效果往往存在一定的缺陷,如生物质炭、腐熟秸秆大量施入土壤后虽然可以较好地改善土壤质量,但会增加养分的淋溶风险^[9-10],进而造成水体污染,而 PAM 大量施用有可能起到相反的效果。因此,将不同材料复合施用进行优势互补对土壤进行改良成为目前研究的热点。伍海兵等^[11]将土、砂、绿化植物废弃物以及脱硫石膏等以一定比例混合对绿地土壤进行改良,与施用单一改良材料相比取得了更好的改良

效果;陈方鑫等^[12]将农业秸秆复合 PAM 施用对湖滨带土壤进行改良也得到相似的结论。改良剂对土壤的改良效果往往会因土壤性质的差异而有所不同,且目前将农业废弃物应用于绿地土壤改良的研究报道也较少。因此,将农业废弃物应用于绿地土壤改良其具体效果需要进一步探究。

本研究选用砂、腐熟秸秆、生物质炭为基础改良材料,并将之与不同浓度 PAM 混合,探究换填介质的物理性质以及氮、磷、COD 的解吸量随 PAM 不同添加浓度的变化规律,以期为城市绿地土壤换填介质的筛选提供一定的理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自西咸新区城市土壤(过 2 mm 筛),砂子为过 3 mm 土筛的河砂,PAM 为阴离子型,分子量为 500 万,腐熟秸秆为小麦秸秆经堆肥腐熟后的产物,生物质炭为小麦秸秆生物质炭;土、砂、腐熟秸秆和生物质炭部分理化性质见表 1。

表 1 土、砂、腐熟秸秆和生物质炭基础性质

供试材料	C/(g·kg ⁻¹)	N/(g·kg ⁻¹)	P/(g·kg ⁻¹)	最大持水量/(g·kg ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)
土	16.9±0.06c	0.5±0.06c	0.8±0.02c	584.65±6.97d	1.30±0.01b
砂	1.1±0.10d	0.1±0.01d	0.4±0.01c	280.06±4.57c	1.56±0.01a
基质	241.3±4.27b	19.8±0.03b	5.9±0.64a	2050.60±6.08b	0.50±0.01c
生物质炭	514.7±0.56a	12.7±0.02a	1.9±0.20b	8616.10±20.89a	0.16±0.02d

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同供试材料间差异显著($p<0.05$)。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 室内培养和采样 将土+砂+腐熟秸秆(SSJ,体积比为 4:4:2)以及土+砂+生物质炭(SSS,体积比为 4:4:2)分别与 PAM 混匀(表 2)。然后在口径 13.5 cm、高 9 cm 的塑料盒中,于 2018 年 6 月 10 日至 7 月 10 日在西北农林科技大学南校区旱棚培养,装填时先分别将腐熟秸秆(180 cm³)、生物炭(180 cm³)和 PAM 在大盆中混匀,然后再与土(360 cm³)、砂(360 cm³)混匀,将混匀后的土壤分层压实,层与层之间刮毛,以使容重与西咸新区绿地土壤容重处于同一水平(1.4 g/cm³)。培养结束后(培养前后高度变化见表 3),用已知质量的环刀采取塑料盒内的填料土,随即将采后的环刀在水中浸泡,测定饱和导水率和饱和含水量。塑料盒内剩余土于晾土室内风干,过 2 mm 筛,装袋待用。

1.2.2 静态解吸 于 2018 年 8 月初至 9 月初进行静态解吸试验。试验步骤为:准确称取 2.5 g 培养后的换填介质(过 2 mm 筛)于 50 mL 离心管中,添加 25 mL 人工配置的污水(表 4),滴加几滴甲苯,在 25 ℃ 恒温、180 r/min 频率下振荡 16 h 以后,以转速 3 000

r/min 离心 10 min,定量滤纸过滤,测定滤液中 COD、全氮、全磷含量。

表 2 不同换填介质配比

处理	土	砂	腐熟秸秆	生物质炭	PAM/(g·100 mL ⁻¹)
1	4	4	2		0(CK)
2	4	4	2		0.50
3	4	4	2		0.75
4	4	4	2		1.00
5	4	4	2		1.50
6	4	4		2	0(CK)
7	4	4		2	0.50
8	4	4		2	0.75
9	4	4		2	1.00
10	4	4		2	1.50

注:表中物料(PAM 除外)比均为体积比,不同浓度 PAM 配置方式为每 100 mL 水中添加 0~1.5 g 的 PAM,换填介质中 PAM 添加量(松散物料)为 0.076 mL/cm³。

土壤净解吸量计算公式为:

$$Q=\frac{(C_{\text{出}}-C_{\text{本}})*V}{m}$$

式中: Q 为单位质量养分解吸量(g/kg); $C_{\text{出}}$ 表示平衡后解吸液中的养分浓度(mg/L); $C_{\text{本}}$ 为添加污水的浓度(mg/L); m 为烘干介质质量(g); V 为加入污水的体积(L)。

表 3 培养前后高度变化		单位:cm
介质 配比	初期 高度	培养结束后 高度
SSJ	7.2	7.0±0.10
SSJ+0.5%PAM	7.2	7.6±0.09
SSJ+0.75%PAM	7.2	7.7±0.01
SSJ+1.0%PAM	7.2	7.9±0.08
SSJ+1.5%PAM	7.2	7.6±0.01
SSS	7.0	7.1±0.06
SSS+0.5%PAM	7.0	7.4±0.07
SSS+0.75%PAM	7.0	7.5±0.07
SSS+1.0%PAM	7.0	7.8±0.15
SSS+1.5%PAM	7.0	7.7±0.01

表 4 人工配置污水的浓度及所用试剂		单位:mg/L	
项目	全氮	全磷	COD
浓度	8	2	300
配水试剂	硝酸钾	磷酸二氢钾	葡萄糖

1.2.3 试验测定方法 土壤容重采用环刀法^[13]测定,土壤饱和导水率采用双环刀法^[8]测定,土壤饱和含水量采用称重法^[14]测定。COD采用消解比色法^[15]测定,总

表 5 添加不同浓度 PAM 后换填介质物理性状			
介质配比	导水率/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水量/%
SSJ	1.17±0.08Bb	1.44±0.02Aa	28.28±3.49Cb
SSJ+0.5%PAM	2.18±0.63ABa	1.31±0.02Ba	35.99±1.81ABa
SSJ+0.75%PAM	3.10±0.08Aa	1.28±0.02BCa	34.53±0.77Ba
SSJ+1.0%PAM	3.69±0.75Aa	1.25±0.03Ca	39.65±1.90Aa
SSJ+1.5%PAM	3.17±0.89Aa	1.31±0.01Ba	37.93±0.61ABb
SSS	2.18±0.33Ba	1.36±0.01Ab	35.92±0.56Ba
SSS+0.5%PAM	3.34±0.14ABa	1.31±0.01Ba	36.52±0.77Ba
SSS+0.75%PAM	3.37±0.22ABa	1.28±0.01BCa	37.63±0.84ABa
SSS+1.0%PAM	3.53±0.68Aa	1.22±0.04Da	39.64±0.97Aa
SSS+1.5%PAM	3.35±0.45ABa	1.23±0.00CDb	40.14±0.16Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示同一换填介质不同 PAM 浓度之间差异显著($p<0.05$);同列不同小写字母表示同一 PAM 浓度不同换填介质之间的差异显著($p<0.05$)。下同。

添加 PAM 对土壤容重的影响,一方面是因为 PAM 会吸水膨胀,其产生的物理作用力可能会改变土壤的紧实度,进而对土壤容重产生影响^[20];另一方面是因为 PAM 作为高分子化合物,可以将松散的土壤颗粒桥接在一起^[21],增加了土壤中 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体的含量^[22],从而改善了土壤孔隙度,降低了土壤容重。当 PAM 质量浓度超过 1.0% 时,换填介质的容重开始上升。这与 PAM 具有的黏结性和增稠性有关,随着其质量浓度的增大,PAM 会黏结成团,不能在土壤中充分扩散,导致其对土壤的桥接作用降

氮(TN)采用过硫酸钾消解紫外分光光度法^[16]测定,总磷(TP)采用过硫酸钾消解法^[17]测定。

1.3 数据处理方法

数据采用 SPSS 20.0 数据分析软件分析,作图用 Excel 2010。

2 结果与分析

2.1 添加 PAM 对换填介质物理性质的影响

土壤容重是土壤的基本物理性质,对土壤的保水、入渗性能等都有很大的影响,土壤饱和导水率是反映土壤入渗性能的重要指标^[8]。土壤饱和含水量是反映土壤水源涵养能力的重要指标之一。因此本试验选取这 3 个物理指标进行测定,其在 PAM 不同添加浓度下变化见表 5。

2.1.1 对换填介质容重的影响 添加 PAM 可使 2 种换填介质(SSJ、SSS)的容重较 CK(无添加)有所降低,且在 PAM 质量浓度为 1.0% 时,换填介质容重最低。介质的容重随 PAM 用量的变化可以用二次曲线关系来描述(图 1)。在不添加 PAM 时 SSJ 换填介质的容重大于 SSS 换填介质,且差异明显,这是因为生物质炭的比表面积、孔隙结构、表面官能团的数量都优于腐熟秸秆,对土壤容重的改善能力更强所致^[18-19]。

低,土壤孔隙度下降,土壤容重上升^[21]。

2.1.2 对换填介质饱和含水量的影响 SSJ 换填介质添加 PAM 后其饱和含水量明显增加,饱和含水量随 PAM 浓度增加的变化规律可以用二次曲线关系来描述(图 2),添加 PAM 的质量浓度为 1.0% 时,饱和含水量最高,较 CK 增加 11.37%。SSS 换填介质的饱和含水量随 PAM 浓度增加呈直线增加,添加 PAM 质量浓度为 1.5% 时,其饱和含水量达到最高,较对照提高 4.22%。不添加 PAM 时,SSJ 的饱和含水量显著低于 SSS 换填介质,当添加 PAM 后两者饱和含水量

趋于同一水平。2 种介质的饱和含水量和容重之间呈显著负相关关系($p_{\text{SSJ}}=0.027, p_{\text{SSS}}=0.013$)。

土壤容重决定土壤孔隙状况,从而影响土壤的持水能力。肖兴艳^[23]研究表明,土壤容重和土壤饱和含水量呈显著负相关,这与本试验研究结果一致。添加 PAM 一方面可以降低容重,改善土壤孔隙结构^[12],从而增加土壤持水能力;另一方面,PAM 作为高分子聚合物本身具有极强的吸水性能,施入土壤后,增加了土壤的饱和含水量^[24]。在不添加 PAM 时,SSJ 换填介质容重大于 SSS,从而使得 SSJ 换填介质本身保水能力较 SSS 换填介质的弱。添加 PAM 后,SSJ 换填介质的饱和含水量随 PAM 用量的增加呈现出先增大后减小的趋势,这与 PAM 浓度过高时 SSJ 换填介质容重上升有关(图 1)。

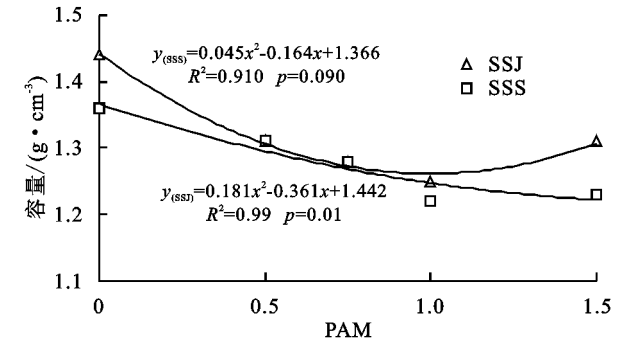


图 1 不同浓度 PAM 对换填介质容重的影响

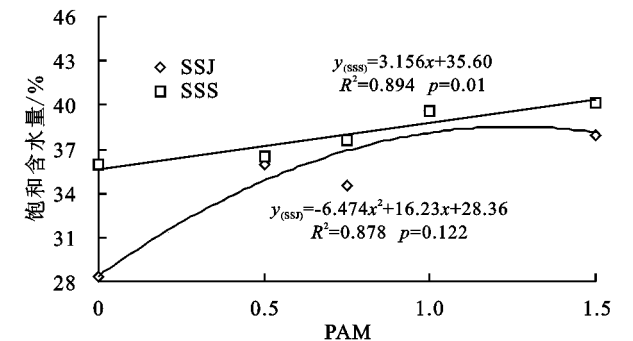


图 2 不同浓度 PAM 对换填介质饱和含水量的影响

2.1.3 对换填介质饱和导水率的影响 在 SSJ 和 SSS 换填介质中,土壤饱和导水率随 PAM 添加量的变化趋势可以用二次曲线方程来描述(图 3)。在一定浓度范围 2 种换填介质的饱和导水率随着 PAM 添加量的增加而增加,当添加 PAM 质量浓度为 1.0% 时,饱和导水率达到最大,较 CK 分别增加 2.52,1.35 m/d,但 PAM 添加量超过一定浓度范围后饱和导水率有所降低。SSJ 的饱和导水率和土壤容重呈显著负相关关系($p=0.022$),SSS 的饱和导水率和容重的关系可以用二次曲线关系来描述(图 4)。在不添加 PAM 时 SSJ 的饱和导水率显著小于 SSS,添加 PAM 后两者处于同一水平。

在不添加 PAM 时,SSJ 由于本身容重高于 SSS

(图 1),孔隙度相对较少,因此其饱和导水率较低。添加 PAM 后换填介质的饱和导水率开始增加,是因为 PAM 可以降低土壤容重和改善孔隙结构,增加水分的入渗路径,从而使土壤饱和导水率增加^[21,25]。当添加 PAM 的浓度超过 1.0% 时,换填介质饱和导水率开始下降,这与韩凤朋等^[8]研究结果相似。这可能是因为 PAM 本身可以溶于水,具有增稠性和絮凝性,当质量浓度过大时,本身会絮凝成团,甚至会黏结在土壤颗粒表面堵塞土壤孔隙,使得水流的渗透路径减少,降低了换填介质的饱和导水率^[8,21]。

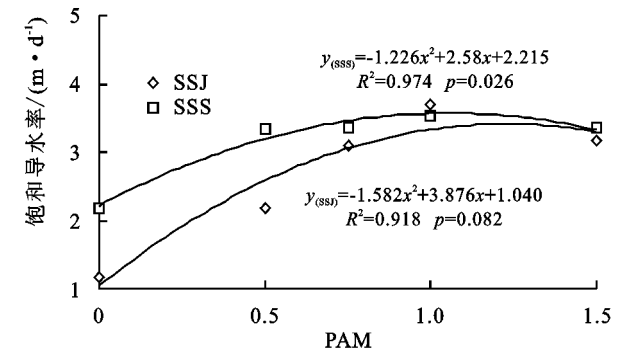


图 3 不同浓度 PAM 对换填介质饱和导水率的影响

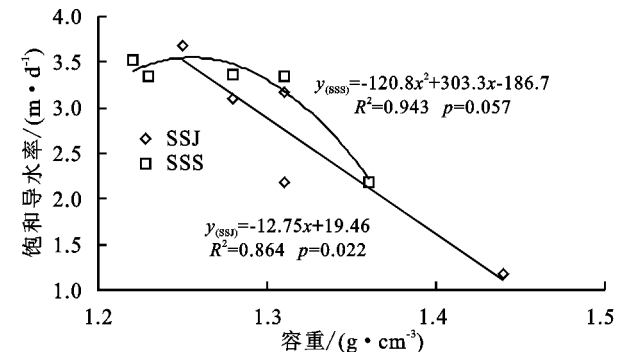


图 4 SSS 换填介质容重和饱和导水率关系

2.2 换填介质养分在不同浓度 PAM 下的解吸特征 腐熟秸秆和生物质炭中含有较高的碳、氮、磷养分,而过量的碳、氮、磷养分淋失进入水体会造成严重的水体污染,本试验在静态解吸条件下换填介质氮、磷、COD 解吸量具有随 PAM 用量增加的变化规律,结果见表 6。

2.2.1 COD 解吸量随添加 PAM 质量浓度的变化 化学需氧量(COD)主要表征水中有机物质的含量,是衡量水质优劣的重要指标之一。SSJ 和 SSS 换填介质经静态解吸平衡后,SSJ 换填介质 COD 解吸量高于 SSS 换填介质;添加 PAM 使 COD 解吸量分别降低 12.20%~30.56% 和 153.28%~194.75%。当 PAM 用量为 1.0% 时,SSJ 和 SSS 换填介质 COD 的解吸量最低。SSJ 和 SSS 换填介质 COD 解吸量随 PAM 用量的变化可以用二次曲线来描述(图 5)。

添加 PAM 后换填介质 COD 解吸量较不添加

PAM 有所降低,这一方面是因为 PAM 本身对有机碳有吸附能力^[26];另一方面是因为 PAM 施入土壤后可以增加土壤大团聚体含量,改善土壤孔隙,增大土壤表面粗度,从而增加了土壤对有机碳的固持能力^[27]。SSS 换填介质 COD 解吸量较 SSJ 换填介质

低。一方面是因为腐熟秸秆密度较大,同体积换填下腐熟秸秆施入土壤碳的总量较高,而较高的有机碳施入量会导致换填介质 COD 解吸量较高^[28];另一方面可能是因为生物质炭具有较高的比表面积,施入土壤后在土壤中稳定性较高,COD 不易解吸^[29]。

表 6 换填介质在静态吸附条件下氮、磷、COD 解吸特征

配比	N/(g·kg ⁻¹)	P/(mg·kg ⁻¹)	COD _(cr) /(g·kg ⁻¹)
SSJ	0.072±0.003Ba	2.300±0.100Ca	0.723±0.013Aa
SSJ+0.5%	0.079±0.002ABa	2.750±1.050Ca	0.612±0.053ABa
SSJ+0.75%	0.091±0.005ABa	4.050±1.300Ba	0.491±0.036Ba
SSJ+1.0%	0.098±0.013Aa	7.800±1.200Ba	0.484±0.059Ba
SSJ+1.5%	0.087±0.007ABa	15.250±1.550Aa	0.567±0.035ABa
SSS	0.032±0.011Ab	-4.100±1.100Bb	0.381±0.150Ab
SSS+0.5%	0.024±0.002Ab	-7.650±1.150Cb	-0.331±0.027Bb
SSS+0.75%	0.025±0.001Ab	-5.500±0.200BCb	-0.359±0.019Bb
SSS+1.0%	0.026±0.001Ab	-3.850±0.650Bb	-0.361±0.106Bb
SSS+1.5%	0.025±0.001Ab	2.000±0.500Ab	-0.203±0.018Bb

注:正值代表析出,负值代表吸附。

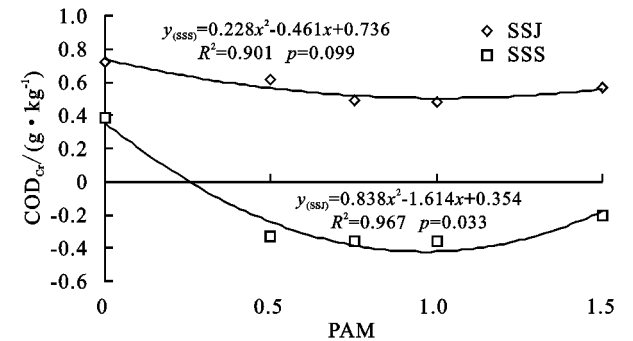


图 5 换填介质在不同浓度 PAM 下 COD 解吸趋势

2.2.2 氮、磷解吸量随添加 PAM 质量浓度的变化
SSJ 换填介质中氮、磷的解吸量随 PAM 用量的增加而增加。其中磷的解吸量和 PAM 的施用量存在显著正相关关系($p=0.031$)。在 SSS 换填介质中,氮、磷的解吸量随 PAM 施用量的增加呈现出先减小后增大的趋势。在施用 PAM 质量浓度为 0.5% 时,SSS 换填介质的氮、磷的解吸量最低。SSJ 换填介质氮、磷的解吸量高于 SSS 换填介质(表 6),这一方面是因为腐熟秸秆带入氮、磷总量要高于生物质炭有关,进而造成 SSJ 换填介质氮、磷解吸量较高;另一方面是因为生物炭和腐熟秸秆相比具有更高的比表面积,对氮、磷的吸附能力较强^[30]。

PAM 在 2 种介质中对氮、磷解吸的影响趋势不一致。在 SSJ 换填介质中,因为 PAM 本身是有机大分子,当其分布于介质表面时可以掩盖吸附点位,从而降低介质对氮、磷的吸附,增加其解吸量^[31]。在 SSS 介质中,添加 PAM 较低浓度时介质的氮、磷的解吸量较 CK 相比有所减少,但是随着 PAM 用量的

继续增加,氮、磷的解吸量开始增加。罗在波等^[32]也发现了同样的现象。这是因为 SSS 换填介质中生物质炭会使得溶液中阳离子较为丰富,添加低浓度 PAM 时可吸附介质溶液中的阳离子,通过这些阳离子进一步吸附 PO_4^{3-} 、 NO_3^- ,从而降低了氮、磷的解吸量,但当 PAM 浓度较高时,PAM 会竞争一些 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 的吸附点位而引起氮、磷解吸量增加^[33-34]。因此,添加 PAM 后是吸附大于解吸,还是解吸大于吸附,取决于用 PAM 的用量和介质类型,其机理还有待进一步深入研究。

3 结论

(1)添加一定浓度的 PAM,可以增加土+砂+腐熟秸秆(SSJ)和土+砂+生物质炭(SSS)2 种换填介质的饱和含水量和饱和导水率,降低其容重。SSJ 介质的氮、磷解吸量随 PAM 用量的增加而增加,而 SSS 介质在添加较低浓度 PAM 时会减少氮、磷解吸量和 COD 的解吸量。

(2)PAM 适宜添加浓度为 1.0%,在该添加量下,土+砂+生物质炭介质的吸附净化能力优于土+砂+腐熟秸秆介质。

参考文献:

[1] Leroy M C, Portet-Koltalo F, Legras M, et al. Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area[J].Science of the Total Environment, 2016,566/567:113-121.
[2] Mylavarapu R S, Zinati G M. Improvement of soil properties using compost for optimumparsley production in sandy soils

- [J].Scientia Horticulturae,2009,120:426-430.
- [3] Naeini S A R M, Cook H F. Influence of municipal waste compost amendment on soil water and evaporation [J].Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(19/20):3147-3161.
- [4] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J].Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2010,171(4):591-596.
- [5] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition[J]. Soil Use & Management,2011,27(2):205-212.
- [6] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
- [7] 于健,雷廷武.不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.
- [8] 韩凤朋,郑纪勇,李占斌,等.PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):70-74.
- [9] 张一,李厚华,何绪生,等.不同外源添加物质对土壤磷素淋溶和迁移特征的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):151-156,222.
- [10] 邢英,李心清,王兵,等.生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土柱模拟[J].生态学杂志,2011,30(11):2483-2488.
- [11] 伍海兵,方海兰,李爱平.常用绿地土壤改良材料对土壤水分入渗的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):317-323,330.
- [12] 陈方鑫,卢少勇,冯传平.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,2016,35(4):711-718.
- [13] 李培培,汪强,文倩,等.不同还田方式对砂质潮土理化性质及微生物的影响[J].生态学报,2017,37(11):3665-3672.
- [14] 皮广洁,唐书源.农业环境监测原理与应用[M].成都:成都科技大学出版社,1998:69-70.
- [15] Soleymani A R, Salen J, Bayat H. Artificial neural networks developed for prediction of dye decolorization efficiencywith UV/K₂S₂O₈ process[J].Chemical Engineering Journal,2011,170(1):29-35.
- [16] 中华人民共和国环境保护部.水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
- [17] 国家环境保护局.水质总磷的测定钼酸铵分光光度法: GB 11893—1989[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [18] 王艳杰,李法云,荣湘民,等.生物质材料与营养物配施对石油污染土壤的修复[J].农业环境科学学报,2018,37(2):232-238.
- [19] 刘东,任树梅,杨培岭.聚丙烯酰胺(PAM)对土壤水分蓄渗能力的影响[J].灌溉排水学报,2006,25(4):56-58,63.
- [20] 杨彦明,刘景辉,李立军,等.聚丙烯酸钾对土壤孔隙及含水特性的影响[J].中国土壤与肥料,2015(4):28-35.
- [21] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等.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,2008,24(1):45-49.
- [22] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等.秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J].中国农业科学,2014,47(2):366-373.
- [23] 肖兴艳.喀斯特山区林草复合生态系统土壤水分特性的研究[D].贵阳:贵州大学,2016.
- [24] 冯瑞云,杨武德,王慧杰,等.秸秆扩蓄肥对土壤水分和马铃薯产量品质及水分利用的影响[J].农业工程学报,2012,28(2):100-105.
- [25] 张雪辰,陈诚,苏里坦,等.聚丙烯酰胺改良盐渍土壤的适宜用量研究[J].土壤,2017,49(6):1216-1220.
- [26] 桂起林,马梧桐,邓宇飞,等.复合絮凝剂处理马铃薯淀粉废水[J].水处理技术,2012,38(增刊1):89-91,114.
- [27] Terry R E, Nelson S D. Effects of Polyacrya amide and irrigation methodon soil physical properties [J]. Soil Science,1986,141(5):317-320.
- [28] 邵洪峰,梅洪飞,潘忠潮,等.玉米秸秆还田对土壤有机碳、微生物功能多样性及甘蓝产量的影响[J].浙江农业学报,2016,28(5):838-842.
- [29] 黎嘉成,高明,田冬,等.秸秆及生物炭还田对土壤有机碳及其活性组分的影响[J].草业学报,2018,27(5):39-50.
- [30] 陆文龙,赵标,郭景海.秸秆不同处理方式对土壤氮磷吸附特性的影响[J].科学技术与工程,2017,17(2):126-129,147.
- [31] 张艳艳,唐泽军.PAM 调控土壤养分元素迁移与流失试验研究[J].水土保持通报,2017,37(4):33-39,46.
- [32] 罗在波,魏世强,滕玲玲.聚丙烯酰胺对紫色土氮素淋溶特征的影响[J].土壤通报,2009,40(3):585-589.
- [33] Krauth D M, Bouldin J L, Green V S, et al. Evaluation of a polyacrylamide soil additive to reduce agricultural-associated contamination[J].Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2008,81(2):116-123.
- [34] Mamedov A I, Beckmann S, Huang C, et al. Aggregate stability as affected by polyacrylamide molecular weight, soil texture, and water quality[J].Soil Science Society of America Journal,2007,71(6):1909-1918.