

# 改良绿地介质对海绵城市污染物削减的影响因素

王晨光<sup>1,2</sup>, 尚永泽<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1</sup>, 张阿凤<sup>2</sup>, 陆思旭<sup>2</sup>, 马波<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土地侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 分析改良绿地介质对污染物削减的影响因素, 以为海绵城市的绿地建设提供科学参考。[方法] 通过室内模拟试验, 探究绿地土壤〔土: 砂: 椰糠(4: 4: 2)+1%PAM〕在降雨重现期、淋溶时间以及深度因素综合影响下对污染物的截留特征。[结果] 不同污染物种类在改良介质中影响的主要因素会因污染物种类的不同而不同。其中深度因素对氮、化学需氧量(COD)的淋溶浓度贡献率较大, 降雨重现期因素对磷淋溶浓度贡献率较大。氮、COD淋溶浓度随时间的变化的降低趋势可用幂函数或指数函数表示, 磷淋溶浓度随时间变化呈现出先减小后增大的趋势。氮、COD整体淋溶浓度随降雨重现期和深度增加整体均表现出增加的趋势。而磷淋溶浓度随降雨重现期的增加表现出增加的趋势, 随深度的增加表现出降低的趋势。整体来说, 土: 砂: 椰糠(4: 4: 2)+1%PAM改良介质对磷削减能力较强, 对氮、COD削减能力较弱。[结论] 土: 砂: 椰糠(4: 4: 2)+1%PAM改良介质能够有效截留雨水中磷污染物, 可应用于海绵城市绿地建设。

**关键词:** 降雨重现期; 改良绿地; 动态淋溶; 椰糠; 海绵城市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)06-0098-07

**中图分类号:** S156

**文献参数:** 王晨光, 尚永泽, 李占斌, 等. 改良绿地介质对海绵城市污染物削减的影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 98-104. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.014; Wang Chenguang, Shang Yongze, Li Zhanbin, et al. Factors affecting reduction of pollutants in sponge cities by improved green space [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 98-104.

## Factors Affecting Reduction of Pollutants in Spong Cities by Improved Green Space

Wang Chenguang<sup>1,2</sup>, Shang Yongze<sup>1</sup>, Li Zhanbin<sup>1</sup>, Zhang Afeng<sup>2</sup>, Lu Sixu<sup>2</sup>, Ma Bo<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712110, China)

**Abstract:** [Objective] The factors affecting the reduction of pollutants by improved green space media were analyzed, in order to provide a scientific reference for the construction of green space in sponge cities. [Methods] This experiment investigated the pollutant retention characteristics of urban green space [soil: sand: coir (4: 4: 2) + 1% PAM] under the combined influence of the repetition period of rainfall, leaching time and depth through indoor simulation experiments, with a view to providing some reference for greenfield construction in sponge cities. [Results] The main factors affecting the different pollutant types in the modified media varied depending on the pollutant type. Among them, the depth factor had a greater contribution to the leaching concentration of nitrogen and COD, and the repetition period of rainfall had a greater contribution to the leaching concentration of phosphorus. The decreasing trend of nitrogen and COD leaching concentration over time could be expressed by a power function or an exponential function. Phosphorus leaching concentration changed with time, showing a trend of first decreasing and then increasing. The overall leaching concentration of nitrogen and COD showed an increasing trend with the increase of the repetition period of rainfall and substrate depth. The phosphorus leaching concentration showed an increasing trend with the increase of the

收稿日期: 2021-08-30

修回日期: 2021-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原冻融对水蚀过程的作用机理研究”(41771311), “尼罗河上游丘陵区水土保持与高产高效农业研究”(41561144011)

第一作者: 王晨光(1994—), 男, 河南省济源市人, 博士研究生, 研究方向为土壤化学。Email: 15129656512@163.com。

通讯作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀及水土保持等方面的研究。Email: zbli@xaut.edu.cn。

repetition period of rainfall, and showed a decreasing trend with the increase of the depth. On the whole, soil mixed with sand and coir (4 : 4 : 2) + 1% PAM had a stronger ability to reduce phosphorus, but a weaker ability to reduce nitrogen and COD. [Conclusion] Soil mixed with sand and coir (4 : 4 : 2) + 1% PAM improved medium can effectively intercept phosphorus pollutants in rainwater, and can be used in the construction of sponge urban green space.

**Keywords:** repetition period of rainfall; improved gree space; dynamic leaching; coir; sponge cities

由于城市化的发展,城市雨水径流污染愈发严重,严重威胁地下水和河流湖泊的水生态安全,有研究<sup>[1-3]</sup>表明道路径流已经成为城市面源污染的主要来源之一。2018 年中国环境生态公报显示,我国大量河流和湖泊处在不同程度的富营养化状态中,在监测的 111 个重要湖泊(水库)中,富营养状态的湖泊(水库)有 31 个,占 29%,较 2014 年向增长了 4%。削减城市径流污染对于缓解河流湖泊水污染,实现生态可持续发展具有重要的意义。传统的雨水处理模式主要通过灰色设施进行调节,但随着经济的发展,单纯依靠灰色设施处理雨水污染的模式难以为继<sup>[4-5]</sup>。并且随着生态保护研究的深入,人们发现充分发挥绿色设施对于雨水的调控具有重要意义。目前国外主要形成了效仿自然排水方式的城市雨洪可持续发展的管理体系。例如,英国的“可持续城市排水系统”(SUDS),澳大利亚的“水敏感城市设计”(WSUD)以及新西兰的“低影响城市设计与开发”(LIUDD)体系<sup>[6-8]</sup>,并且取得了较好的效果。我国吸取国外先进经验并结合我国实际,提出了海绵城市的建设。城市绿地具有削减道路径流<sup>[9]</sup>,涵养水源的作用,是海绵城市建设中重要的天然海绵体,但由于人为活动的影响,致使绿地质量遭到严重破坏,不能满足海绵城市建设的要求,因此需要进行改良<sup>[10]</sup>。并且绿地土壤对雨水污染的削减效果还会受到土壤成分、流量负荷、渗滤深度和降雨重现期等因素的影响<sup>[11-13]</sup>,因此对绿地介质进行改良并探究其在不同影响因素下的污染物削减规律,对于海绵城市绿地的建设具有一定的意义。为此本试验以绿地介质改良中常用的椰糠、PAM 为改良材料<sup>[14]</sup>对绿地土壤进行改良并探究改良绿地土壤在不同降雨重现期、不同换填深度、不同淋溶时间下的污染物削减规律。以期能为海绵城市建设提供一定的理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自陕西省西安市西咸新区(108°76'E, 34°44'N)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,椰糠购于斯里兰卡,材料部分理化性质详见表 1。

表 1 试验材料基础性质

材料	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	总有 机碳/%	全氮/ %	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )
椰糠	0.09	55.6	0.68	0.57
土	1.3	1.69	0.05	0.8
砂	1.56	0.11	0.01	0.4

### 1.2 试验设计与方法

#### 1.2.1 动态淋溶试验

(1) 淋溶水量的计算。根据西安市暴雨强度公式计算出 2 a 和 5 a 降雨重现期且降雨历时为 100 min 时的暴雨强度,然后再根据汇流面积及径流系数计算出需要加入的污水的量,并根据设定集水时间计算出进水流速,具体结果详见表 2。

(2) 柱子装填。将土、沙、椰糠和 PAM 按比例混合后(混合体积比为土 : 砂 : 椰糠(4 : 4 : 2), PAM 浓度为 0.01 g/ml, PAM 添加量为 0.076 ml/cm<sup>3</sup>)装进柱子中,柱子内径 10 cm,高度 50 cm,在柱子底部铺上 5 cm 厚的石英砂,然后装填改良的绿地土壤,分层装填,每 5 cm 装层,压实,刮毛,容重控制在 1.4 g/cm<sup>3</sup>,一共装填 40 cm 厚的土壤。

(3) 进水和集水步骤。柱子填充完 毕后,先用清水饱和,再根据表 2 信息用恒流泵加入配置的污水(表 3)。由于柱子预留空间的限制,为模拟野外积水深度的差异,因此本试验将污水分为 6 次加。在 2 a 降雨重现期下每次进水 300 ml,进水高度为 3.8 cm。5 a 降雨重现期下每次进水 400 ml,进水高度为 5 cm。同时为探究污染物淋溶浓度随深度变化的规律,试验每隔 10 cm 设置集水口,共设置 4 个集水口。然后进行分层收取。集水时间为进水 2, 6, 14, 24, 36, 48 和 72 h,集水时 4 个集水口同时打开,上层收集较快,因此当上层集齐 15 ml 后,关闭上层集水口,以后逐次关闭。将收集的滤液过 0.45 μm 滤膜后,测定其淋出液中污染物的浓度。

表 2 不同降雨重现期下进水流速

重现期/ a	暴雨强度/ (L · s <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )	汇流 面积/m <sup>2</sup>	设定集水 时间/min	径流 系数	流速/ (L · min <sup>-1</sup> )
2	42.95	0.078 5	100.00	0.9	0.018
5	56.09	0.078 5	100.00	0.9	0.024

注:汇流比取 10 : 1。

表 3 人工配置污水的浓度及所用试剂

项目	全氮	全磷	COD	Cu	Zn	Cd
浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	8.0	2.0	300.0	2.25	30.0	1.50
配水试剂	硝酸钾	磷酸二氢钾	葡萄糖	氯化铜	硫酸锌	氯化镉

1.2.2 试验测定方法 淋溶液 COD 采用消解比色法,淋溶液总氮(TN)采用过硫酸钾消解紫外分光光度法,淋溶液总磷(TP)采用过硫酸钾消解法。

### 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 不同影响因素对改良介质削减氮、磷、COD 的贡献率分析

多因素方差分析表明(表 4),降雨重现期、时间、深度以及它们之间的交互作用对改良介质削减氮、磷、COD 的能力都有显著影响。在对污染物氮、COD 的削减中,深度因素对改良介质污染物削减能力贡献率较大,分别为 30.50%和 45.69%,其次是时间因素,其贡献率分别为 29.62%,27.17%。而在对磷污染物的削减中,不同影响因素贡献率最大的为降雨重现期,其贡献率比重为 25.38%。可见改良介质在对污染物的削减中,其主要影响因素会因为污染物种类的不同而不同。

表 4 基于方差分析的各因子对改良绿地介质削减污染物的影响显著性及贡献率分析

变量	氮/%	磷/%	COD/%
降雨重现期	1.66**	25.38**	2.34**
时间	29.62**	17.14**	27.17**
深度	30.50**	15.26**	45.69**
重现期—时间	2.77**	4.91**	1.18**
重现期—深度	4.15**	12.28**	5.42**
时间—深度	21.73**	15.04**	12.32**
重现期—时间—深度	8.63**	4.56**	4.06**
误差	0.95**	7.32**	1.81**

注: \*\* 表示在 0.01 水平下极显著。

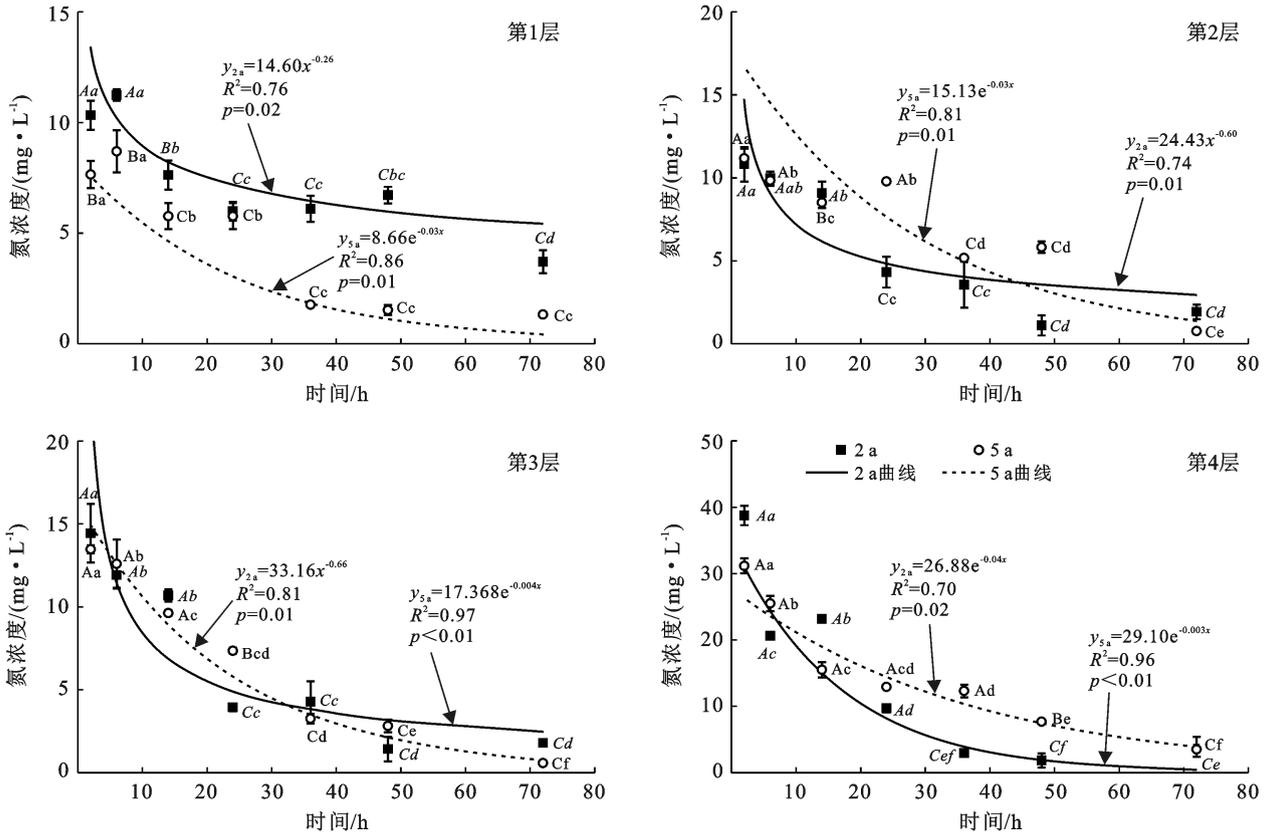
### 2.2 改良介质对氮、磷、COD 污染物随时间延长的削减规律

改良介质在不同降雨重现期下不同层次的氮污染物淋溶浓度均随时间的延长而降低。在 2 a 降雨重现期下前 3 层氮污染物淋溶随时间的延长呈幂函数变化趋势,而第 4 层氮淋溶浓度变化较为剧烈,呈现指数变化趋势。5 a 降雨重现下氮污染淋溶浓度随

时间的变化均呈现指数函数变化趋势。在淋溶前期,氮污染物淋溶浓度高于进水浓度,但随着时间的延长,其淋溶浓度开始低于进水浓度,表现为对污染物的削减作用。在 2 a 降雨重现期下第 1 至第 4 层出水浓度小于等于进水浓度的时间点分别为 14,24,24 和 36 h;在 5 a 降雨重现期下第 1 至第 4 层出水浓度小于等于进水浓度的时间点分别为 2,14,24 和 48 h。随着层次的加深,其氮淋溶浓度低于进水浓度的时间呈现出延后的趋势(图 1)。在不同降雨重现期下,改良介质不同层次的磷淋溶浓度随着时间的变化整体呈现出先减小后增大的趋势,部分磷淋溶规律符合二次函数变化规律。改良介质对磷有较高的吸附率,在不同时间段改良介质的磷淋溶浓度始终低于进水浓度(图 2)。改良介质在不同降雨重现期下不同层次的 COD 淋溶浓度随时间的降低趋势可以用指数函数来描述。除 5 a 降雨重现期下第 4 层 COD 随时间的延长其出水浓度始终显著高于进水浓度外,其余处理的 COD 淋溶浓度均在 48 h 左右其进水浓度与出水浓度相比较,出水浓度小于等于出水浓度,配比开始由析出转为截留(图 3)。

### 2.3 改良介质对氮、磷、COD 污染物随降雨重现期变化的削减规律

在氮污染物淋溶中,第 1 层在 2 a 降雨重现期下的氮淋溶浓度高于 5 a 降雨重现期下的氮污染物淋溶浓度。随着层次的加深,第 2 层、第 3 层、第 4 层在 2 a 降雨重现期下的氮淋溶浓度低于 5 a 降雨重现期下的氮淋溶浓度,但是未达到显著水平。2 a 和 5 a 降雨重现期下的氮淋溶浓度整体上差异不显著。不同降雨重现期下的磷污染物在改良介质不同层次的淋溶浓度均随着降雨重现期的增加而增加,且 5 a 降雨重现期下改良介质的磷污染物淋溶浓度高于 2 a 降雨重现期下的磷污染物淋溶浓度。第 1 层 COD 在 2 a 降雨重现期下的淋溶浓度高于 5 a 降雨重现期下的 COD 淋溶浓度,随着层次的加深,在第 2、第 3 层是不同层次随降雨重现期的变化未表现出明显差异。在第 4 层时 COD 在 2 a 降雨重现期下的淋溶浓度低于 5 a 降雨重现期下的 COD 淋溶浓度。整体来说,2 a 降雨重现期 COD 在改良介质中的淋溶浓度低于 5 a 降雨重现期下的 COD 淋溶浓度(表 5)。



注:小写字母表示同一降雨重现期下不同淋溶时间点差异,大写字母表示出水浓度与进水浓度的比较,A,B,C分别表示出水浓度高于、无差异和低于进水浓度。斜体字母的为2 a降雨重现期差异性,其余为5 a降雨重现期差异。下同。

图 1 绿地改良介质氮污染物随出水时间延长的淋溶规律

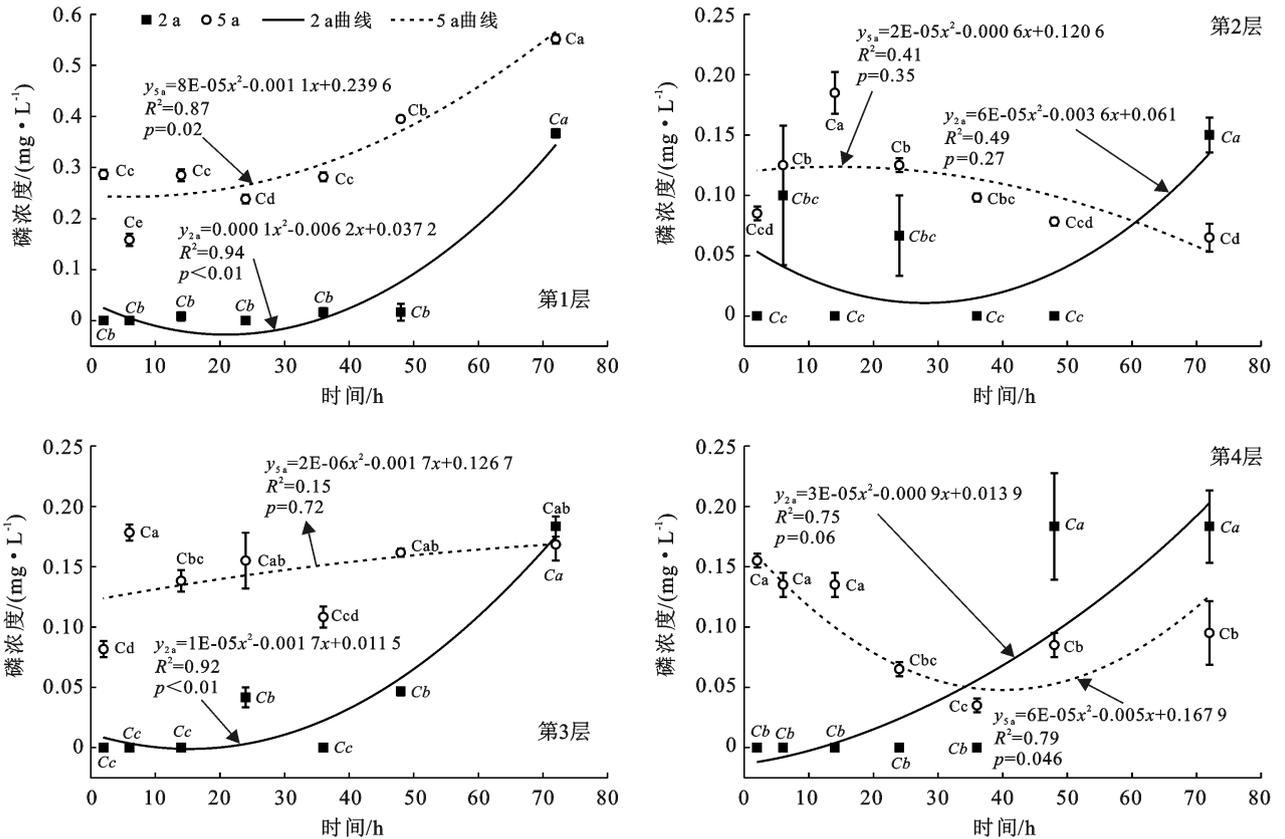


图 2 绿地改良介质磷污染物随出水时间延长的淋溶规律

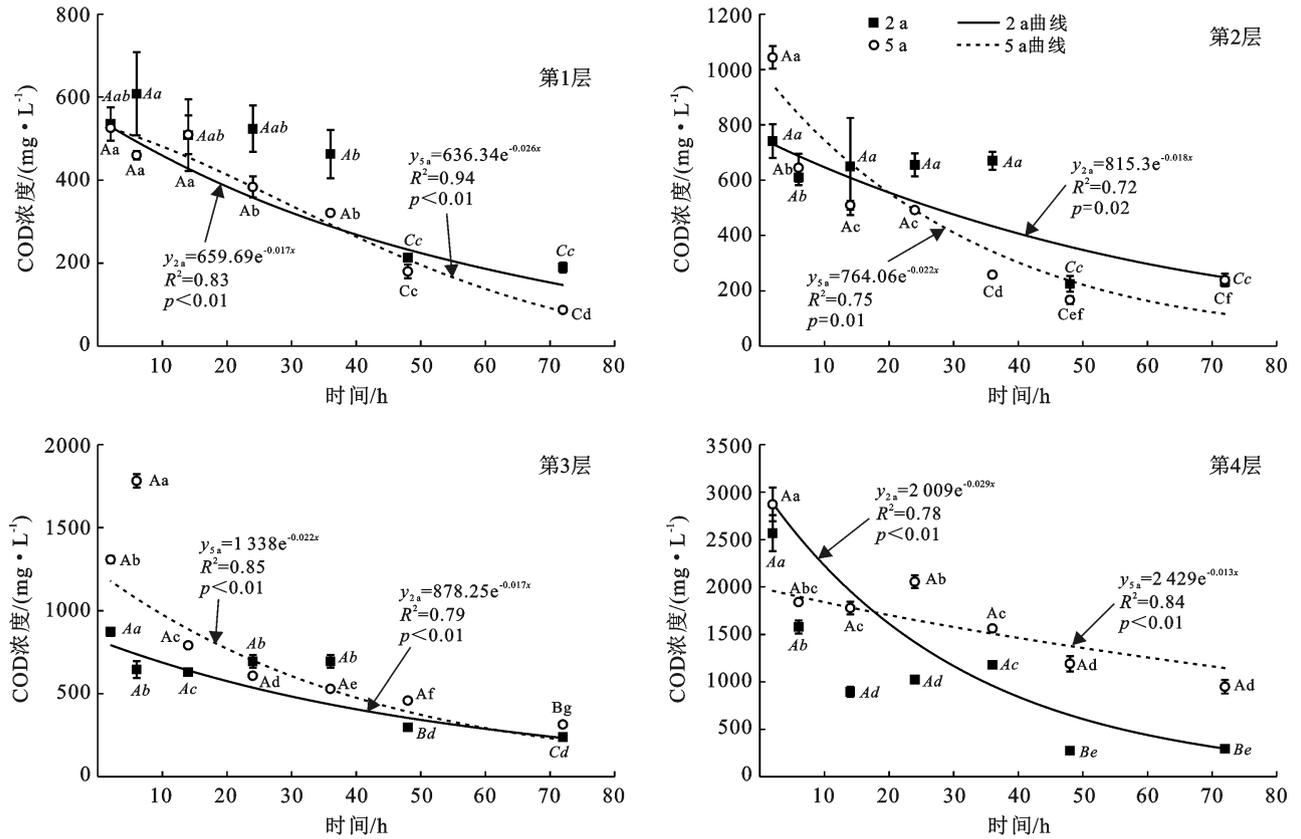


图 3 绿地改良介质 COD 随出水时间延长的淋溶规律

表 5 不同降雨重现期下不同层次改良介质对氮、磷、COD 污染物削减规律

降雨重现期	氮/(mg·L <sup>-1</sup> )	磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )
2 a(1层)	7.53±0.99 <sup>a</sup>	0.06±0.05 <sup>b</sup>	434.46±62.41 <sup>a</sup>
5 a(1层)	4.64±1.17 <sup>b</sup>	0.31±0.04 <sup>a</sup>	352.41±12.69 <sup>b</sup>
2 a(2层)	5.83±1.53 <sup>a</sup>	0.05±0.02 <sup>b</sup>	540.48±9.04 <sup>a</sup>
5 a(2层)	7.3±1.37 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>a</sup>	479.01±10.71 <sup>a</sup>
2 a(3层)	6.93±1.99 <sup>a</sup>	0.04±0.02 <sup>b</sup>	552.3±9.42 <sup>a</sup>
5 a(3层)	7.1±1.91 <sup>a</sup>	0.14±0.01 <sup>a</sup>	827.12±14.15 <sup>a</sup>
2 a(4层)	14.42±5.18 <sup>a</sup>	0.05±0.03 <sup>b</sup>	1 115.31±17.31 <sup>b</sup>
5 a(4层)	15.52±3.67 <sup>a</sup>	0.1±0.02 <sup>a</sup>	1 749.15±24.64 <sup>a</sup>
2 a(整体)	8.64±1.52 <sup>a</sup>	0.05±0.01 <sup>b</sup>	666.87±53.70 <sup>b</sup>
5 a(整体)	8.64±1.32 <sup>a</sup>	0.17±0.02 <sup>a</sup>	851.92±75.48 <sup>a</sup>

注:字母表示不同降雨重现期下同一层次的比较,整体是指将不同层次的出水浓度做整体的配对样本 *T* 检验,1层表示深度 0—10 cm,2层表示深度 10—20 cm,3层表示深度 20—30 cm,4层表示深度 30—40 cm。下同。

## 2.4 改良介质对氮、磷、COD 污染物随深度变化的削减规律

将不同降雨重现期下的污染物淋出浓度做整体分析时,氮、COD 淋溶浓度随着层次的加深而升高,而磷淋溶浓度随着层次加深表现出降低的趋势。在 2 a 降雨重现期下,氮在改良介质中的淋溶浓度表现随层次的加深表现出先降低后升高的趋势,在 5 a 降雨重现期下,氮在改良介质中的淋溶浓度随层次的

加深其淋溶浓度升高。COD 在不同降雨重现期下其在改良介质中淋溶浓度均随着层次的加深而增加。在 2 a 降雨重现期下,磷在改良介质中的淋溶浓度随层次的加深未表现出明显差异,但是在 5 a 降雨重现期下,其淋溶浓度随着层次的加深表现出降低的趋势(表 6)。

表 6 不同污染物随深度的淋溶变化规律 mg/L

项目	层次	氮	磷	COD
整体	1层	6.09±1.80 <sup>d</sup>	0.19±0.42 <sup>a</sup>	393.44±12.88 <sup>d</sup>
	2层	6.56±1.93 <sup>c</sup>	0.08±0.24 <sup>c</sup>	504.5±15.78 <sup>c</sup>
	3层	7.01±2.19 <sup>b</sup>	0.09±0.26 <sup>b</sup>	698.73±20.05 <sup>b</sup>
	4层	14.97±3.35 <sup>a</sup>	0.08±0.26 <sup>c</sup>	1 440.92±27.33 <sup>a</sup>
降雨重现期 2 a	1层	7.53±0.99 <sup>b</sup>	0.06±0.05 <sup>a</sup>	434.46±62.41 <sup>c</sup>
	2层	5.83±1.53 <sup>c</sup>	0.05±0.02 <sup>a</sup>	540.48±9.04 <sup>b</sup>
	3层	6.93±1.99 <sup>b</sup>	0.04±0.02 <sup>a</sup>	552.3±9.42 <sup>b</sup>
	4层	14.42±5.18 <sup>a</sup>	0.05±0.03 <sup>a</sup>	1 115.31±17.31 <sup>a</sup>
降雨重现期 5 a	1层	4.64±1.17 <sup>c</sup>	0.31±0.04 <sup>a</sup>	352.41±12.69 <sup>d</sup>
	2层	7.3±1.37 <sup>b</sup>	0.11±0.02 <sup>c</sup>	479.01±10.71 <sup>c</sup>
	3层	7.1±1.91 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>b</sup>	827.12±14.15 <sup>b</sup>
	4层	15.52±3.67 <sup>a</sup>	0.1±0.02 <sup>c</sup>	1 749.15±24.64 <sup>a</sup>

## 3 讨论

在海绵城市建设中,氮、COD 污染物在改良介质

中淋溶浓度随着时间的延长而降低,在后期时部分处理的污染物淋溶浓度已经低于进水浓度,刘晓军<sup>[15]</sup>和王志强等<sup>[16]</sup>也得到了相似的结果。这可能是因为淋溶前期由于材料本身污染物本底值相对较高,致使在淋溶前期污染物浓度较高,但随着时间的推移,材料的污染物本底值经过淋溶开始降低,因此后期污染物的出水浓度开始降低<sup>[17-18]</sup>。磷污染物在改良介质中随着时间的延长表现出先增大后减小的趋势,刘彬彬等<sup>[19]</sup>也得到了相似的结论。这可能是因为填料对污水中磷的去除主要是由于物理吸附和化学吸附的过程,在试验前期其吸附位点比较充足,且一些带负电荷物质的淋溶也会增加磷的吸附点位,因此对污水中的磷有较好的去除效果。但是随着时间的增加,材料表面的吸附位点逐渐减少,在后期的时候对磷的去除效果有些许降低<sup>[20-21]</sup>。

磷淋溶浓度受降雨重现期影响较大,这与赵瑞松<sup>[22]</sup>在典型LID设施填料优化设计研究中得到的结论相似。这可能是因为随着降雨重现期的增大,流量负荷相应增加,高流量负荷能够促进物质的向下迁移。而磷在土壤中迁移能力相对较弱,因此高降雨重现期的作用更加凸显<sup>[11,23-24]</sup>。氮、磷、COD在5a降雨重现期下的淋溶浓度高于2a降雨重现期,这是因为高流量负荷下,水力停留时间减少,土壤渗滤负荷增大,导致土壤吸附时间减少,而且高流量也可能导致更多的污染物被淋洗,这可能是导致在高降雨重现期下改良介质氮、磷、COD析出量较多的原因<sup>[12,25]</sup>。氮、COD随降雨重现期的增加,在第1层时,2a降雨重现期下氮、COD淋溶浓度高于5a,这可能是由于高降雨重现期下,流量负荷增加,污染物峰值前移所致<sup>[26-27]</sup>。

在对污染物氮、COD的削减中,深度因素对改良介质污染物削减能力贡献率较大,且氮、COD污染物淋溶浓度高于上层,这与Gong等<sup>[28]</sup>研究结论相似。这可能是因为氮、COD相对容易向下层移动而造成富集,因此深度因素对其淋溶浓度影响较大;且在本试验中由于污染物背景值较高,因此在污染物淋溶时深度越深富集的污染物质也就越多,使得下层的污染物浓度高于上层<sup>[29-31]</sup>。而磷淋溶浓度随层次的加深而降低可能是因为材料对磷要表现为吸附的作用,随着渗滤深度的增加,磷在介质中停留时间加长,从而使得更多的磷被吸附,因此磷浓度逐层降低<sup>[25,32]</sup>。

## 4 结论

(1) 改良介质削减海绵城市污染物的主要影响因素会因污染物种类的不同而不同,深度因素对污染

物氮、COD削减能力贡献率较大,降雨重现期因素对磷污染物的削减的贡献率较大。

(2) 氮、COD污染物淋溶浓度随淋溶时间的延长整体表现出降低的趋势,随着降雨重现期和深度增加整体表现出增加的趋势;而磷随淋溶时间的延长整体表现出先减小后增大的趋势,且磷淋溶浓度随着降雨重现期的增加整体表现出增加的趋势,而随着深度增加整体表现出降低的趋势。综合以上研究,土:砂:椰糠(4:4:2)+1%PAM在不同降雨重现期下不同层次的不同时间点的磷出水浓度均低于进水浓度,配比对磷较强有较强的吸附能力。本试验结果能够为海绵城市介质的选填提供一定的依据。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王晓璐.快速城市化区域径流污染特征与综合控制技术研究[D].北京:清华大学,2015.
- [2] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998,124(9):869-879.
- [3] 杨阳,林广思.海绵城市概念与思想[J].南方建筑,2015(3):59-64.
- [4] Mei Chao, Liu Jiahong, Wang Hao, et al. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed [J]. the Science of the Total Environment, 2018,639(15):1394-1407.
- [5] 袁再健,梁晨,李定强.中国海绵城市研究进展与展望[J].生态环境学报,2017,26(5):896-901.
- [6] Ali A, Akhtari S, Sadeghfam R, et al. Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump [J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2014,38(2):126-138.
- [7] Connop S, Vandergert P, Eisenberg B, et al. Renaturing cities using a regionally-focused biodiversity-led multifunctional benefits approach to urban green infrastructure [J]. Environmental Science & Policy, 2016,62:99-111.
- [8] 车生泉,谢长坤,陈丹,等.海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J].中国园林,2015,31(6):11-15.
- [9] 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(1):113-121.
- [10] 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.
- [11] 孙丹焱,郑涛,徐竟成,等.城市绿地土壤渗透性改良对雨水径流污染的削减效果及去除规律[J].环境工程学报,2019,13(2):372-380.

- [12] 王闪.城市下凹式绿地和草地对降雨径流磷污染控制效果研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [13] 秦媛.西安市绿地氮磷流失对水体污染及防治措施研究[D].陕西 西安:长安大学,2018.
- [14] 马笑,王晨光,郝珊,等.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,2020,11(1):112-118.
- [15] 刘晓军.日光温室土壤硝态氮累积淋溶特性及其影响因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [16] 王志强,谢文霞,柴娜,等.牡蛎壳作生物滞留填料对城市地表径流污染物去除效果研究[J].水土保持学报,2019,33(2):128-133,139.
- [17] 赵洪宇,李玉环,宋强,等.煤矸石动态循环淋溶液的特性[J].环境工程学报,2017,11(2):1171-1177.
- [18] Long Guangqiang, Jiang Yujia, Sun Bo. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China [J]. Soil & Tillage Research, 2015,146(B):270-278.
- [19] 刘彬彬,高明,王侃,等.不同生物质灰渣填充密度下处理生活污水的效果研究[J].水土保持学报,2015,29(6):296-300.
- [20] 黄容,高明,廖燕妮.不同生物质灰渣对磷的吸附解吸动力学特征[J].水土保持学报,2014,28(1):156-160.
- [21] Yan Jingming, Bäverman C, Luis Moreno, et al. The long-term acid neutralizing capacity of steel slag-science direct [J]. Studies in Environmental Science, 1997,71:631-640.
- [22] 赵瑞松.典型 LID 设施填料优化设计研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2019.
- [23] 陈莎,陈晓宏.城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟[J].水资源保护,2018,34(5):13-19.
- [24] Kumari K, Moldrup P, Paradelo M, et al. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient [J]. Journal of Environmental Quality, 2014,43(2):647-657.
- [25] 韩丽杰,郑红,马鸿文,等.利用<sup>13</sup>X沸石分子筛净化含NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N废水的试验研究[J].环境工程学报,2008,4(11):1469-1474.
- [26] 李晶.城市雨水径流污染控制理论与技术研究[D].天津:天津大学,2012.
- [27] Gong Yangwei, Yin Dingku, Li Qijun, et al. Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687 (15): 505-515.
- [28] 梁坤,樊玉清.黄河口湿地典型盐碱植被群落土壤氮素的季节动态及根际效应[J].环境化学,2019,38(10):2327-2335.
- [29] 赵春晓.不同材料对河套灌区土壤氮磷钾素淋溶特征分布的影响[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [30] Gong Yangwei, Zhang Xianwei, Li Qijun, et al. Factors affecting the ability of extensive green roofs to reduce nutrient pollutants in rainfall runoff [J]. Science of the Total Environment, 2020,732:139248.
- [31] Dusza Y, Barot S, Kraepiel Y, et al. Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type [J]. Ecology & Evolution, 2017,7(3):2357-2369.
- [32] 成龙,吴卿,龚克娜,等.双基基层绿化屋面的雨水水文水质特征分析[J].环境工程学报,2016,10(11):6153-6158.

(上接第 97 页)

- [24] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等.近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J].农业环境科学学报,2019,290(10):7-26.
- [25] 欧阳蒲月,李亚萍,梁永枢,等.石牌广藿香种植模式初探[J].中药材,2020,43(5):1072-1075.
- [26] 张智慧,杜平,何赢,等.基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法[J].环境科学,2019,40(9):4262-4269.
- [27] Amnai A, Radola D, Choulet F, et al. Impact of ancient iron smelting wastes on current soils; Legacy contamination, environmental availability and fractionation of metals [J]. Science of the Total Environment, 2021,776:145929.
- [28] Tibbett M, Green I, Rate A, et al. The transfer of trace metals in the soil-plant-arthropod system [J]. Science of the Total Environment, 2021, 779 (2): 146260.