

人工湿地的基质及其深度对生活污水中氮磷去除效果的影响

王媛媛, 张衍林

(华中农业大学工程技术学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:目前人工湿地常用的基质一般为土壤、河砂和砾石,这类基质净化效率低,容易吸附饱和,且除磷脱氮的能力不高,致使出水中氮、磷浓度较高。针对于此,本试验研究选择了沸石、草炭、蛭石、页岩、砂子 5 种基质,利用两组模拟土柱系统模拟人工湿地对生活污水的处理,主要研究基质种类及其深度对生活污水处理效果的影响,并根据各基质对生活污水中总氮(TN)、总磷(TP)的去除率进行方差分析及基质对污水处理能力的显著差异性分析。实验结果表明:(1)各基质去除 TN 的能力差别不明显,沸石、蛭石、页岩的处理效果稍好,对 TP 的去除能力依次为草炭>页岩>砂子>沸石>蛭石。(2)基质深度的增加对 2 个指标处理效果的影响不同。对 TN 来说,深度对各基质的处理效果无明显影响。对 TP 来说,当深度在 100 cm 以内时,5 种基质对 TP 的去除率均随深度的增加而明显增大,当深度超过 100 cm 后,各基质的这种增大趋势都不太明显。因此,对这 2 个指标而言,基质的填充深度应为 100 cm。

关键词:人工湿地;基质;深度;脱氮除磷

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)03-0581-06

Effects of the Depth and Variety of Substrates Used in Constructed Wetlands on Nitrogen and Phosphorus Removal

WANG Yuan-yuan, ZHANG Yan-lin

(Engineering Technology Academy, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Soil, sand and gravel are the conventional substrates used in constructed wetland presently, but the disadvantages of these substrates are lower purified efficiency, easily saturation and low removal rates for N and P from domestic wastewater. In allusion to these, the simulating system in this experiment was designed and the substrates poles system using zeolite, peat composed of rotten mosses, vermiculite, shale and sand as substrates simulating actually vertical CW was constructed to treat domestic wastewater for studying the relationship between the variety and the depth of different substrates and the removal rate of TN, TP. The variance of five kinds of substrates and six depths was analysis used SPSS indicated that (1) the ability for removing TN of different substrates was similar, only zeolite, vermiculite and shale were better in some sort. And the order of excellence for removing TP is peat composed of rotten mosses, shale, sand, zeolite, vermiculite. (2) The depth of substrates had little effect on the removal of TN. Within 100 cm, the removal rates of TP of these five substrates became higher with the increasing depth, while exceeding 80 cm, this trend was not obvious. So, for these two indexes, the optimal depth of substrates is 100 cm.

Keywords: constructed wetland; wetland substrate; depth; removal of nitrogen and phosphorus

人工湿地(Constructed Wetland, CW)作为一种新型生态污水处理技术,与传统的污水处理方法相比,具有处理效果好、运转维护管理方便、工程基建和运转费用低,具有环境美学价值等优点,故被广泛用于处理城市生活污水、工农业生产废水^[1]。

但是长期以来,人工湿地系统只采用土壤、砂、砾

石等传统基质,净化效率不高且使其占地面积过大,不适合用于人口密度大、土地资源缺乏的地区。对该类人工湿地系统处理城市污水的研究发现,污水中的氮和磷难以去除,对磷的去除率仅为 30%~50%^[2-4],而且通常在几年内基质对磷的吸附就会饱和,并开始释放过剩的磷^[5],大大制约了湿地净化污水的能力。

在调查了欧洲的几百个用来处理农业污水的湿地后,一些学者指出基质依然是制约湿地污水处理效率的最大不确定性因素。而原来对基质的选择只考虑其渗透性和防堵塞性,没有过多的考虑对氮、磷的去

收稿日期:2008-06-02

作者简介:王媛媛(1980—),女,山东省临沂市人,博士研究生,研究方向为农业生物环境与能源工程。E-mail:wywjb@sina.com

责任作者:张衍林 E-mail:zhangyl@mail.hzau.edu.cn

除效率。因此,必须选择合适的基质,在保持各项去除指标运行平稳性的同时,通过强化基质颗粒对氮磷的物理吸附和化学吸附,使废水除磷脱氮过程更环保更有效,使用寿命更长^[6]。对基质的研究目前已经广泛开展,各种工业副产物、矿石等都引起了人们的关注,沸石(zeolite)^[7-9],白云石(dolomite)^[10]、化工产物煤灰渣(SFS)^[11]、石灰石(limestone)、钙硅石(wollastonite)^[12]、高炉渣(BFS)及各种混合基质如煤渣-草炭已被研究用来作为人工湿地的基质,一些基质被证实具有储量丰富、价格低廉、吸附容量大、对环境无毒害且容易再生等优点。在参考了众多国内外文献研究及实际应用的实例基础上,综合了各种基质的实用性、有效使用寿命、对污染物的净化效果等因素,本试验选择了沸石、草炭、蛭石、页岩等 4 种处理效果较好的物质作为基质,以通常采用的砂子作为比较对象,分析了各自的理化性质及填充深度对总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果的影响。

1 材料与方法

1.1 基质的选择

根据人工湿地基质所必需的理化性质及处理能力,本课题选用了沸石、草炭、蛭石、页岩和砂子等 5 种基质做为模拟土柱的填料。这几种基质在我国的储量均十分丰富,可广泛获得。

由于试验条件的限制,本试验只测定了各基质的 SiO₂、Al₂O₃、空隙率、pH 值、初始磷素含量、粒径分布等基本理化性质。基质初始磷素含量的测定用钼锑抗比色法(3 次测量取平均值),基质矿物量的测定用 X 射线荧光分析法,pH 值测定用酸度计法(基质:水=1:1);全氮采用碱解扩散法。

供试基质的基本理化性质如表 1、表 2、表 3。

表 1 各基质的主要矿物含量

Table 1 The primary mineral content of different substrates

氧化物	砂子/%	沸石/%	蛭石/%	页岩/%
SiO ₂	91.81	67.28	42.86	55.22
Al ₂ O ₃	2.42	13.55	10.10	17.37
CaO	0.32	2.64	1.75	1.18

表 2 各基质的 pH 值及初始磷素含量

Table 2 The pH value and initial P content of different substrates

测定项目	沸石	草炭	蛭石	页岩	砂子
pH 值	7.25	6.56	7.11	6.90	6.99
初始磷素含量/mg·L ⁻¹	1.221 6	0.657 8	0.313 2	2.130 0	1.192 6

表 3 草炭的组分

Table 3 The components of Peat composed of rotten mosses

成分*	有机质/%	全氮/%	全钾/%	腐植酸/%
含量	54	2.3	0.7	25.9

注:* 表示草炭的质地和其他 4 种不同,并不含有 SiO₂ 等矿物,它对磷素的吸附主要依靠其较大的表面积和活跃的微生物环境,因此未对其进行矿物含量的测定。

由于基质本身的粒径大小和粒径分布会影响到污水在湿地中的流速及污水与基质的接触面积,不均匀系数太大的基质还会引起湿地的堵塞,降低人工湿地对污水的净化效果。因此本试验测定了 5 种基质的粒径大小和粒径分布(图 1),以便为模拟土柱对污水的净化效果的分析提供依据。

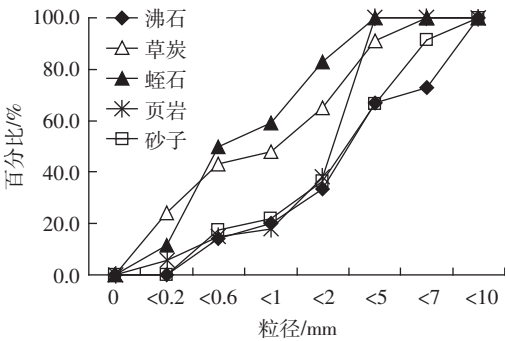


图 1 各基质的筛分曲线

Figure 1 The diameter distributing curve of different substrates

从曲线上可看出页岩和砂子的粒径分布最均匀,不均匀系数 K₈₀ 最小,且粒径偏小,40%的颗粒粒径都在 3 mm 以下,页岩和蛭石的最大粒径均<5 mm,不均匀系数都<15,这说明两者的平均粒径较小,且分布均匀。而草炭的不均匀系数最大,大小颗粒混杂情况较严重。

1.2 试验装置设计

试验采用土柱形式模拟垂直流人工湿地污水处理模式。取 10 根直径 20 cm 的竖直 PVC 管,第一组每根 120 cm,共 5 根,分别填充沸石、蛭石、草炭、页岩及砂子,按粒径大小分层。6~10 管重复,每根管 160 cm,为第二组,按相同次序装料。底部由不锈钢漏斗承接,填充小砾石和豆石做承托层及布水层,漏斗底部铺设金属滤网,避免基质被水流冲出,下端为底端出水口。每组填充基质至距管顶溢流孔约 10 cm 处。

进水系统由下列部分组成:容量为 300 L 的蓄水池、容量 48 L 的不锈钢供水箱、引水管、溢流管、潜水泵和水量控制开关。蓄水池盛放配制的人工污水,由

潜水泵引到模拟土柱架上方的供水箱,再由引水管引至各基质表层,由水量控制开关控制进水水量。试验装置如图2。

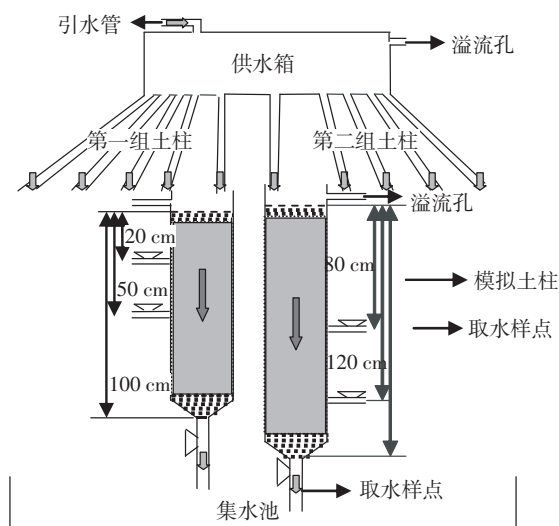


图2 试验装置图

Figure 2 Experiment equipment

1.3 装置的运行

本试验前5 d进水为实际生活污水,以培养和实际人工湿地相似的微生物环境,模拟实际人工湿地的污水处理条件。5 d后进水改为根据实际生活污水的性质人工配制的污水,采用模拟配水的优点是水质稳定且易于控制,根据不同的试验要求,可适时调整配水成分,改变部分进水组分的浓度和配比,使之符合试验要求。

试验运行时间从2006年10月8日至2006年12月26日,共80 d。根据理论水力停留时间的测定方法,本试验设定两组模拟土柱的平均水力停留时间为 (7.2 ± 0.2) h,两组模拟土柱的运行方式完全一致。

本模拟土柱系统置于室内,因此环境温度为室内温度。温度值在整个试验期间略有不同:10月15日至11月12日为17~24℃,11月13日至11月28日为15~21℃,11月29日至12月24日为12~18℃。

1.4 水样采集与水质分析

为了尽量避免取样对测量结果的影响,本试验设计了两组模拟土柱,以适应在不同高度取样的要求。在120 cm组模拟土柱中,分别在距基质表面20、50 cm及下端出水口处(距基质表面100 cm)设置取水样点,在160 cm组模拟土柱中分别在距基质表面80、120 cm及下端出水口处(距基质表面140 cm)设置取水样点,由引水管取水。

取样方法:在取水点套一软管,平时用夹子夹住,取样时松开夹子,软管尽头接一水样瓶,使水充满水

样瓶至溢流,然后将软管重新夹住。

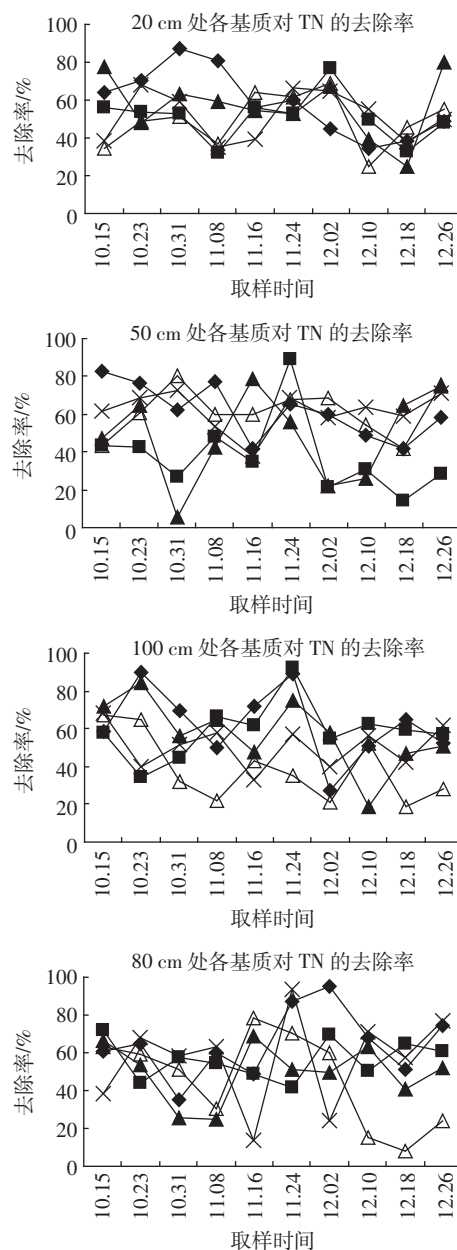
测量方法:TP用国家标准方法 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 氧化法测量,TN用凯氏蒸馏后滴定法测量,参照《水和废水监测分析方法》^[13]。

2 结果

2.1 各基质对TN的去除效果

各基质在不同深度处对TN的去除率见图3。

由图3可见,120 cm组土柱中在20 cm处于试验前阶段沸石对TN的去除效果最好,蛭石其次,草炭和砂子最低。在试验的后半阶段各基质去除效果无明显差异。50 cm处,在试验前期沸石和砂子的去除效果较好,但后期砂子的平均去除率较高。在100 cm处



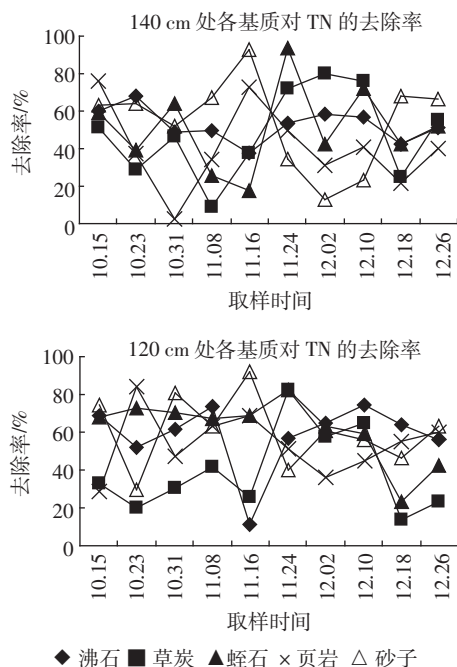


图 3 各基质在 6 个取样高度处对 TN 的去除率

Figure 3 The removing effect for TN of different substrates

沸石与蛭石的稍高, 平均去除率分别为 63.18% 和 59.44%, 页岩其次, 草炭和砂子稍低, 平均去除率分别为 51.33% 和 39.92%。

对 160 cm 组土柱来看, 处理情况类似于 120 cm 组土柱。同一基质对 TN 的去除率变化极大, 呈无规律性。80 cm 处沸石对 TN 的去除率稍高一些, 最高去除率达 95.31%。120 cm 处蛭石的处理效果稍好, 最高去除率为 82.50%, 但最低去除率为 23.56%, 波动很大。

2.2 各基质对 TP 的去除效果

各基质在不同深度处对 TP 的去除率见图 4。

120 cm 组土柱中, 在 20 cm 处各基质对 TP 的去除效果差不多, 最高值出现在草炭的第 3 次取样上, 为 77.05%, 草炭的平均去除率稍高于其他 3 种, 砂子最低。这可能与砂子的初始含磷量较高且表面积较小、吸附性能差有关。50 cm 处草炭对 TP 的去除率明显高于其他 4 种, 且出水水质稳定。除页岩外, 其余 3 种处理

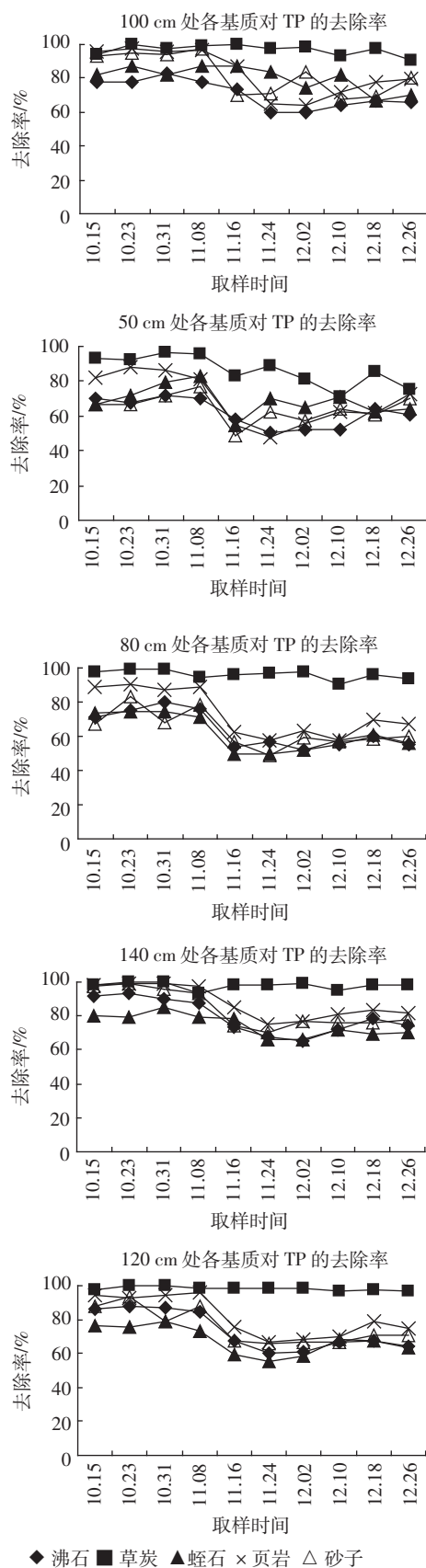
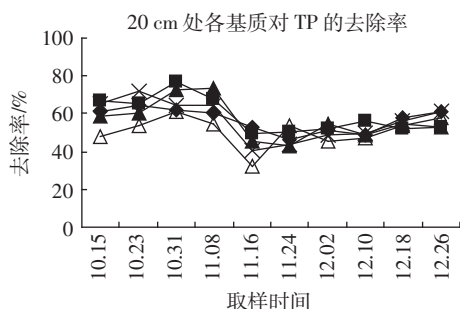


图 4 各基质在 6 个取样高度处对 TP 的去除率

Figure 4 The removing effect for TP of different substrates

效果差不多, 试验阶段平均值均在 56%~76%之间。100 cm 处在整个试验过程中草炭对 TP 的去除率均在 90%以上。页岩在试验前阶段去除率较高, 在 96.14%~97.25%之间, 但在后半阶段有所下降, 砂子对 TP 的去除率随时间的推移迅速下降, 蛭石的去除率稍低。

160 cm 组土柱中, 草炭对 TP 的去除率也远远高于其他 4 种基质, 装置运行稳定后草炭对 TP 的去除率都高于 90%, 其次为页岩。仅对含磷量来说, 各高度处污水出水均达到二级排放标准。其他 3 种基质蛭石、沸石、砂子的去除 TP 效果相差不大。一般来说, 当基质深度达到 100 cm 时, 对 TP 去除效果基本可达到排放要求。

由两组土柱对 TP 的去除效果可看出, 当深度在 100 cm 以内时, 5 种基质对 TP 的去除率均随深度的增加而明显增大, 当深度超过 100 cm 后, 各基质的这种增大趋势都不太明显。

本试验选用的页岩没有 Drizo 报道的页岩对磷素的去除率(98%~100%)高, 这是因为选用的页岩种类不同, 其中的 SiO_2 、 Al_2O_3 等矿物的含量也不相同, 因此去除效果也会有差别。

3 讨论

3.1 由各基质对 TN 的去除率来进行基质的方差及差异显著性分析

综合来看, 经过 80 d 的运行, 沸石、蛭石、页岩对 TN 的处理效果要好于砂子和草炭。沸石的去除效果最好, 其原因可能是由于 NH_4^+ 直径小于沸石内部的通道, 因而能够被沸石吸附。蛭石分子的层间填充着可交换性的阳离子和水分子, 这种结构使蛭石具有很强的离子交换能力, 因此对氨氮的去除效果也较好。而草炭由于其粒径的不均匀系数较大, 易造成堵塞, 影响进水的渗透率和空气的流通, 易形成缺氧环境而导致其对 TN 的去除效果不太理想。

但是由图中可看出, 在试验的前半阶段各基质对 TN 的去除率变化很大, 这与 Gerke 等的研究是相符的, 在他的研究当中, TN 的去除率可以从 16%变化到 90%^[14]。Lenz A 的研究也验证了这一点^[15]。这可能是由于试验运行初期, 各基质内部的微生物环境还不成熟, 硝化/反硝化过程进行得不彻底, 故去除率不稳定, 随着试验的进行, 在后半阶段出水水质即变得相对稳定。但也有人得出经过人工湿地处理后的污水出水 TN 浓度比较稳定的结论^[16]。

运用 SPSS 软件进行方差分析和多重比较, 结果

如表 4。可看出, 120 cm 组土柱中, 在 20 cm 处各基质对 TN 的去除效果无显著差异($P>0.05$), 而在 50 cm 处页岩、沸石、砂子、蛭石与草炭存在极显著差异($P<0.01$), 在 100 cm 处基质存在显著差异($0.01<P<0.05$)。160 cm 组土柱中, 在 80、120、140 cm 处各基质对 TN 的去除效果均无显著差异($P>0.05$)。这表明当在同一运行方式下, 基质的深度过小(本试验中为 20 cm)时, 基质的理化性质的差异对 TN 去除效果的影响不大, 而超过一定值(本试验中为 80 cm)后, 基质的差异对污水中 TN 的处理效果影响也开始减小, 超过 100 cm 该差异非常小。基质的深度与氧气在其中的传输性能成正比, 深度越大, 基质中所含氧气就越少, 基质中微生物生长环境逐渐由好氧状态转向厌氧状态。在本试验中, 两组土柱除基质深度有变化外, 其他试验条件均无变化。结合上述基质深度与其对 TN 去除效果的差异性, 说明好氧/厌氧条件是影响其去除效果的主要因素。考虑到污水处理量和工程费用问题, 实际应用中不同基质深度的确定尤其重要。

3.2 由各基质对 TP 的去除率来进行基质的方差及差异显著性分析

采用 SPSS 软件分析 10 个土柱在不同高度处处理污水的效果及差异显著性, 比较结果如表 5。

可看出, 120 cm 组土柱中在 20 cm 处基质对 TN 的去除效果差异不显著, 50、100 cm 深度的去除效果存

表 4 各基质对 TN 去除效果的多重比较结果

Table 4 The multiple comparison of difference on TN of 5 substrates

基质深度	20 cm ¹⁾	50 cm	100 cm	80 cm ²⁾	120 cm	140 cm
多重 比较 结果	沸石 a ³⁾	页岩 a	沸石 a	沸石 a	蛭石 a	砂子 a
	蛭石 a	沸石 a	草炭 a	页岩 ab	砂子 a	沸石 a
	页岩 a	砂子 a	蛭石 a	草炭 ab	沸石 a	蛭石 a
	草炭 a	蛭石 a	页岩 ab	蛭石 ab	页岩 ab	草炭 a
	砂子 a	草炭 b	砂子 b	砂子 b	草炭 ab	页岩 a

注: 1) 20、50、100 cm 为 120 cm 组土柱的各个取样点深度, 以下同。2) 80、120、140 cm 为 160 cm 组土柱的各个取样点深度, 以下同。3) 各基质按在整个试验阶段的平均去除率的高低来排列, 同列基质间不同字母表明 Duncan's 多重比较差异显著($P<0.05$), 表 5 注释同表 4。

表 5 各基质对 TP 去除效果的多重比较结果

Table 5 The multiple comparison of difference on TP of 5 substrates

基质深度	20 cm	50 cm	100 cm ¹⁾	80 cm	120 cm	140 cm ²⁾
多重 比较 结果	草炭 a ³⁾	草炭 a	草炭 a	草炭 a	草炭 a	草炭 a
	沸石 ab	页岩 b	页岩 b	页岩 b	页岩 b	页岩 b
	页岩 ab	蛭石 b	砂子 b	沸石 c	砂子 bc	砂子 bc
	蛭石 ab	砂子 b	蛭石 b	砂子 c	沸石 bc	沸石 cd
	砂子 a	沸石 b	沸石 c	蛭石 c	蛭石 c	蛭石 cd

在极显著差异($P<0.001$),说明在该深度处基质的理化性质对磷的去除效果影响非常大,草炭的去除效果最好,砂子最差。160 cm 组土柱中在 80 cm 处草炭与页岩对 TN 的去除效果最好,其他 3 种无显著差异;120、140 cm 处差异出现在草炭、页岩和其他 3 种基质之间,但差异性变小,说明随深度的增加,各基质自身的理化性质对 TP 去除效果的影响开始变小,考虑到实际应用中的经济效益,各基质最佳填充深度为 100 cm。

综合来看,草炭基质对污水中 TP 的去除效果最好,且下降趋势平缓,受水力负荷、时间和温度的影响小,有效使用寿命长。蛭石的去除率虽然不是太高,但出水中 TP 浓度变化较小,使用寿命较长。因此可以得出这 5 种基质对 TP 的处理效果顺序如下:草炭>页岩>砂子>沸石>蛭石。

4 结论

(1)各基质去除 TN 的能力差异不明显,同一基质对 TN 的去除率波动较大,呈无规律性。沸石、蛭石、页岩对 TN 的处理效果好于砂子和草炭。

(2)对 TP 的去除能力依次为草炭>页岩>砂子>沸石>蛭石。草炭对 TP 去除率最高最稳定,页岩和砂子对 TP 的去除率较高,但随运行时间的增加去除率下降较快。蛭石的去除率稍低,但出水 TP 浓度变化小,达到吸附饱和的时间较长。

(3)在 20、80、120、140 cm 处各基质对 TN 的去除效果无显著差异,在 50 cm 处页岩、沸石、砂子、蛭石与草炭存在极显著差异,在 100 cm 处基质存在显著差异。说明低于 20 cm 或超过 80 cm 后,基质的理化性质的差异对 TN 去除效果的影响无较大差异。

(4)当深度在 100 cm 以内时,5 种基质对 TP 的去除率均随深度的增加而明显增大,当深度超过 100 cm 后,增大趋势不明显。因此,对本文中这 2 个指标而言,基质的填充深度应为 100 cm。

参考文献:

- [1] 于少鹏,王海霞,万忠娟,等.人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景[J].地理科学进展,2004,23(1):22-29.
- [2] YU Shao-peng, WANG Hai-xia, WAN Zhong-juan, et al. Treatment technology of wastewater using constructed wetland and its present status and future prospects in China[J]. *Geography*, 2004, 23(1):22-29.
- [3] Kivaisi K A. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing country and a review[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16:545-560.
- [4] 崔理华,朱夕珍,汤连茂,等.城市污水人工土快滤床与水生植物复合处理系统[J].中国环境科学,2000,20(5):432-435.
- [5] CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, TANG Lian-mao, et al. Combining artificial soil filter and aquatic plant for treating municipal sewage[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(5):432-435.
- [6] 梁威,吴振斌.人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J].环境科学动态,2000,12(3):32-37.
- [7] LIANG Wei, WU Zhen-bin. The research of the removal mechanism about N and P of wastewater using constructed wetland[J]. *Environmental Science Trends*, 2000, 12(3):32-37.
- [8] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphorus adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrate in constructed wetland systems[J]. *Water Res*, 1998(32):393-399.
- [9] House C H, Broome S W, Hoover M T. Treatment of nitrogen and phosphorus by a constructed upland-wetland wastewater treatment system[J]. *Wat Sci Tech*, 1994, 29:177-184.
- [10] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1999, 33(17):3595-3602.
- [11] 徐丽花,周琪.不同填料人工湿地处理系统的净化能力研究[J].上海环境科学,2002,21(10):603-605.
- [12] XU Li-hua, ZHOU Qi. Study on purification ability of artificial wetlands with different fillers[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2002, 21(10):603-605.
- [13] Brooks A S, Rozenwald M N, Geohring L D, et al. Phosphorus removal by wollastonite; a constructed wetland substrate[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15:121-132.
- [14] Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed substrates of subsurface flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17:345-355.
- [15] 袁东海,等.几种人工湿地基质净化磷素的机理[J].中国环境科学,2004,24(5):614-617.
- [16] YUAN Dong-hai, et al. Mechanism of phosphorus purification in some kinds of substrates constructed wetland systems[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5):614-617.
- [17] 崔理华,朱夕珍,骆世明,等.垂直流人工湿地系统对污水磷的净化效果[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(7):13-17.
- [18] CUI Li-hua, ZHU Xi-zhen, LUO Shi-ming, et al. The purification efficiency of phosphorus by means of nertical-flow constructed wetlands treatment system[J]. *Techniques and Equipment For Enviro. poll. cont*, 2002, 3(7):13-17.
- [19] 国家环保局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2000.
- [20] The National Environmental Protection Agency. Monitoring and analysis method of water and wastewater [M]. Beijing:Publishing House of Chinese Environmental Science, 2000.
- [21] Elisabeth Kvarnstrom, et al. Plant-availability of phosphorus in filter substrates derived from small-scale wastewater treatment systems[J]. *Ecological Engineering*, 2004, 22:1-15.
- [22] Lenz A, Wild U. Nitrogen and phosphorus budget in rewetted fens[J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 44(11-12):143-149.
- [23] Headley T R, Huett D O, Davison L. The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetlands [J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 44(11-12):77-84.