

垂直流人工湿地系统基质优化级配研究

武俊梅^{1,2}, 张翔凌³, 王荣^{1,2}, 徐栋¹, 贺锋^{1*}, 吴振斌^{1*}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

摘要:选取生物陶粒、无烟煤、沸石、钢渣和蛭石为基质, 按不同的级配方式填充成基质柱, 进行垂直流人工湿地模拟柱净化污水实验. 研究表明, 粒径分层级配基质对 COD 的去除率均高于单一粒径基质, 其中分层生物陶粒对 COD 的平均去除率高达 72.91%. 分层沸石对总氮的净化能力较单一粒径基质有所提高, 平均去除率高达 91.23%. 填充了生物陶粒、沸石和无烟煤的模拟柱对有机物和氮的净化效果和单一基质没有显著性差异 ($p < 0.05$). 填充钢渣和无烟煤的模拟柱出水 pH 值均在正常范围内, 但是除从上到下依次填充无烟煤、蛭石和钢渣的基质柱外, 其它填充钢渣和无烟煤的模拟柱对磷素的净化能力都低于单一基质. 种植植物对净化效果没有明显影响. 在垂直流人工湿地中, 针对水质特点选择高效的级配基质, 如分层生物陶粒、分层沸石、分层无烟煤以及生物陶粒、沸石和无烟煤组合, 在高水力负荷条件下可获得更好的处理效果.

关键词:垂直流人工湿地; 基质; 级配

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1227-06

Study on Optimization Gradation of Substrates in Vertical Flow Constructed Wetlands

WU Jun-mei^{1,2}, ZHANG Xiang-ling³, WANG Rong^{1,2}, XU Dong¹, HE Feng¹, WU Zhen-bin¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Bio-ceramic, anthracite, zeolite, steel slag and vermiculite were used as substrate according to different kinds of gradation to treat wastewater in vertical-flow constructed wetlands simulation systems. The results show that the removal ability of COD by graded substrates according to particle size are better than single substrates, and average removal efficiency by graded bio-ceramic is up to 72.91%. The removal rate of TN by graded zeolite, which reaches 91.23%, is higher than single zeolite. No significant difference ($p < 0.05$) is detected with regard to organic matter and nitrogen removal between single and combined use of bio-ceramic and zeolite. The pH values in effluents of all columns filled with steel slag and anthracite are within normal limits, but phosphorus removal of all columns filled with steel slag and anthracite are lower than that filled with single substrates, except for the column filled with anthracite, vermiculite and steel slag from up to down. No difference between planted and unplanted systems can be observed. The present results probably provide a basis for vertical-flow constructed wetland design, among which based on the characteristic of wastewater proper selection of high-efficiency graded substrates, e. g., graded bio-ceramic, graded zeolite, graded anthracite, combined use of bio-ceramic, zeolite and anthracite, is a guarantee of better performance at a high hydraulic loading rate.

Key words: vertical flow constructed wetlands; substrate; gradation

在生态工程技术中, 由于垂直流人工湿地净化效率较高, 占地面积较小, 20 世纪 90 年代以来越来越受到人们的重视^[1], 并已得到大规模推广应用^[2]. 其中基质是人工湿地的重要组成部分, 为植物和微生物提供生长介质, 为水流提供良好水力条件的同时, 也能够通过过滤、吸附和沉淀等作用直接去除污染物^[3], 影响着人工湿地的净化能力和运行的稳定性, 为此, 研究基质的净化效果和相关净化机制十分重要. 国内外对单一基质的去污效果进行了较多研究, Drizo 等^[4]研究表明, 页岩能有效去除污水中的磷, 对氮的净化能力相对较差; 钙化红藻对总磷的去除率高达 98%, 而对氮的去除率较低^[5]; 钙

硅石^[6]和钢渣^[7]能有效去除污水中的磷, 但是关于级配基质去污效果的研究报道尚少, Prochaska 等^[8]研究了石英砂和白云石按 10:1 比例配成的组合基质对磷的去除效果, 石英砂 (0.121 mg/g) 和白云石 (0.168 mg/g) 对磷的最大吸附容量低于钙化红藻 (1.2 mg/g)^[5]、页岩 (0.65 mg/g)^[9] 和炉渣 (8.89

收稿日期: 2009-06-02; 修订日期: 2009-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50808172); “十一五”国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07106-002-004); 湖北省科技攻关重大项目 (2006AA305A03); 武汉市科技攻关项目 (200860213022)

作者简介: 武俊梅 (1985 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制技术.

* 通讯联系人, E-mail: hefeng@ihb.ac.cn; wuzb@ihb.ac.cn

mg/g)^[10],组合基质对磷的去除率仅为 45%;谭洪新等^[11]研究了页岩和钢渣组合脱氮除磷效果.

本实验根据张翔凌等^[12, 13]的研究结果,选用净化效果较好且抗堵塞能力较强的基质,在较高水力负荷下进行了同种基质不同粒径级配和不同基质级配的垂直流人工湿地模拟柱的运行效果试验,比较各种基质级配的净化效果,并与单一基质净化效果进行横向比较,通过湿地基质的合理组配来强化基质对污水的处理效果,并维持运行的稳定性,以期为人造湿地基质的选择和级配提供借鉴和参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验进水水质

本试验进水为湖水和生活污水在调节池搅拌后的混合水,其中湖水取自武汉东湖茶港排污口,生活污水取自中国科学院水生生物研究所办公楼前化粪池,湖水和生活污水的混合体积比为 1:2,调节池中供试进水水质监测结果如表 1 所示.

表 1 供试进水各污染物浓度

Table 1 Concentrations of pollutants in the tested influent

指标	范围	平均值	标准差
温度/℃	9.3 ~ 25.5	19.1	5.0
pH	7 ~ 8.31	7.76	0.39
COD/mg · L ⁻¹	35 ~ 155	90	35
TN/mg · L ⁻¹	6.289 ~ 15.909	10.249	3.202
NH ₄ ⁺ -N/mg · L ⁻¹	4.216 ~ 15.474	8.711	2.873
NO ₂ ⁻ -N/mg · L ⁻¹	0.008 ~ 0.023	0.015	0.004
NO ₃ ⁻ -N/mg · L ⁻¹	0.007 ~ 0.214	0.099	0.061
TP/mg · L ⁻¹	0.326 ~ 1.781	1.059	0.372
TDP/mg · L ⁻¹	0.319 ~ 1.545	0.816	0.360
SRP/mg · L ⁻¹	0.251 ~ 1.357	0.706	0.334

1.1.2 试验基质

试验所选基质包括生物陶粒、无烟煤、沸石、钢渣和蛭石,其中生物陶粒取自江西萍乡三和轻化有限公司,无烟煤和沸石取自河南巩义华龙滤料厂,钢渣取自武汉钢铁集团冶金渣有限责任公司,蛭石取自辽宁大连中德珍珠岩厂.所有基质均为颗粒状.各基质主要成分如表 2 所示^[14].

1.1.3 试验装置

本试验装置采用内径 25 cm 的 PVC 管共 8 根,高度均为 100 cm,其中基质高度为 90 cm,管顶留有 10 cm 的保护层.混合污水利用蠕动泵(PULSAFEEDER 计量泵 DC3B)提升,通过转子流量计(红旗 LZB-10)调节水量,然后由管顶的环形穿孔布水管进入基质柱,由管底出水.各模拟基质柱基

质级配方式如图 1,其中 A、B、C 和 D 基质柱均为同种基质不同粒径分层级配基质柱,A 和 B 基质柱分别填充 3 种粒径的生物陶粒和无烟煤,C 和 D 基质柱均填充 2 种粒径的沸石,其中 D 基质柱中种植了植物美人蕉;E、F 和 G 基质柱均为不同基质分层级配基质柱,分 3 层填充不同的基质;H 基质柱中填充钢渣和无烟煤等体积混合后的混合基质,未分层.

表 2 各基质主要化学成分/%

Table 2 Main chemical composition of the tested substrates/%

氧化物	生物陶粒	无烟煤	沸石	钢渣	蛭石
CO ₃	—	74.6	—	—	7.97
SiO ₂	64.07	6.98	66.46	33.09	40.62
SO ₃	—	7.65	—	2.5	—
Na ₂ O	—	—	1.08	—	—
MgO	4.06	—	—	8.4	23.55
Al ₂ O ₃	19.84	7.36	13.14	14.88	13.08
K ₂ O	1.46	—	2.42	—	4.33
CaO	—	1.1	3.16	36.13	—
Fe ₂ O ₃	8.69	1.69	1.3	1.05	5.48
TiO ₂	0.86	—	—	—	—

1.2 试验方法

1.2.1 试验运行方式

试验柱采用连续进出水方式,配水周期为 1 周,1 周内连续运行 2 次,每次运行 8 h 后采样分析各水质指标.本试验系统采用高水力负荷,每根试验柱水力负荷控制在 2.4 ~ 3.4 m³/(m² · d),试验共历时 10 个月.

1.2.2 水质指标及分析方法

pH 值采用在线测定仪测定(Thermo ORION 5-STAR),COD 采用重铬酸钾消解哈希仪(HACH-DR/2400)测定,其他指标采用国家环保局标准分析方法^[15]:TN 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂比色法;NO₂⁻-N 采用分光光度法;NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法;TP、TDP 和 SRP 均采用钼酸铵分光光度法.数据采用 SPSS13.0 进行单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 进水和各级配基质柱出水 pH 值

进水和各级配基质柱出水 pH 值如图 2,从中可看出,各出水 pH 值均大于进水 pH 值,平均值在 7.89 ~ 8.28 之间.对实验数据进行方差分析表明:A、G 和 H 基质柱出水与进水 pH 值存在显著性差异(Tamhane's T2, $p < 0.05$),C 和 D 基质柱出水 pH 值没有显著性差异,而 F 和 G 基质柱出水 pH 值存在显著性差异.

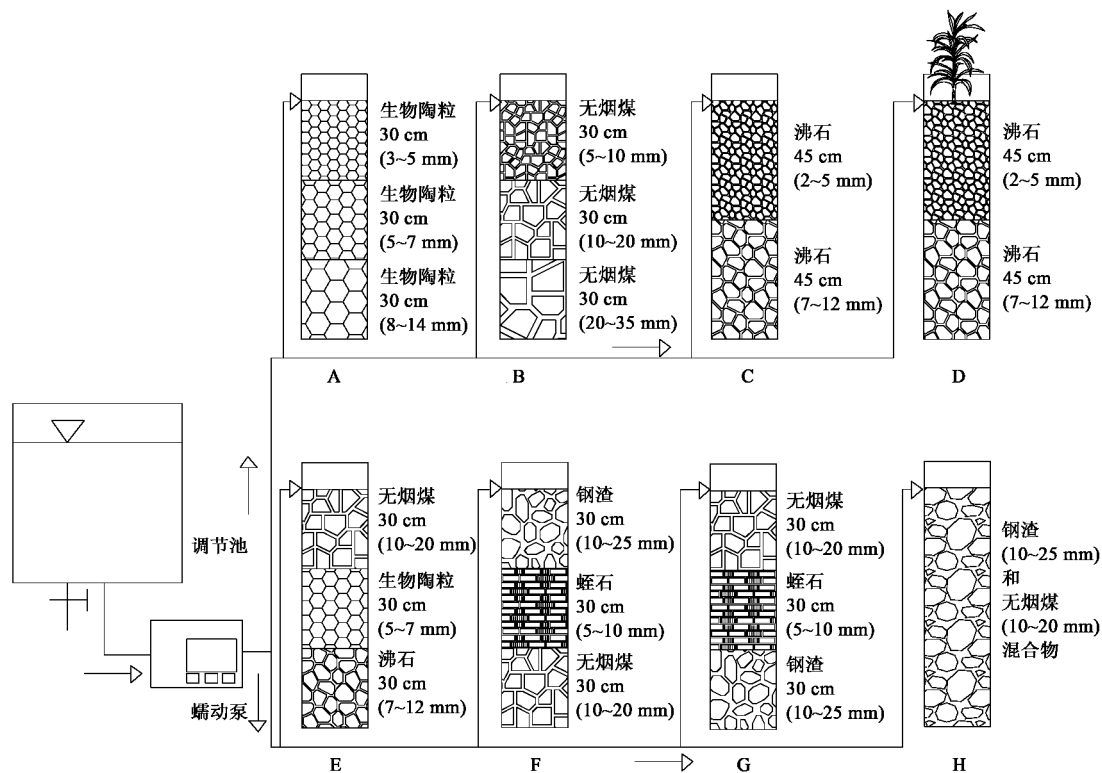


图 1 各模拟基质柱示意

Fig. 1 Schematic diagram of simulation systems with different graded substrates

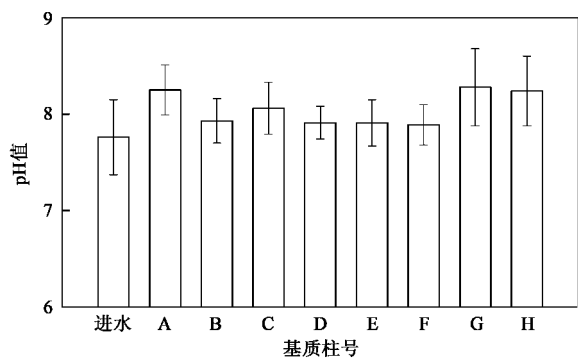


图 2 进水和各基质柱出水 pH 值

Fig. 2 Average pH of the influent and effluents

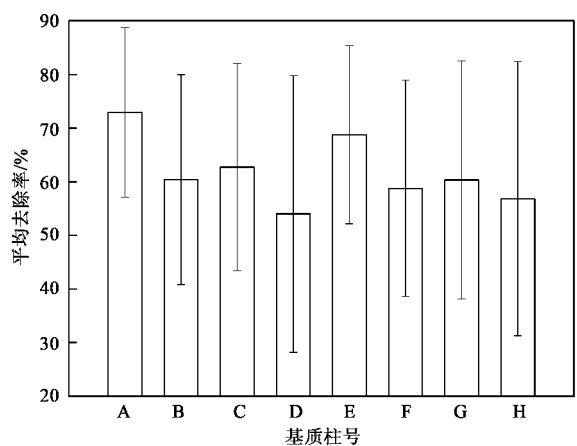


图 3 各基质柱对 COD 的平均去除率

Fig. 3 Average removal rates of COD in all columns

2.2 各级配基质柱对 COD 的去除

各基质柱对污水中的 COD 净化效果如图 3, 其中 A 和 E 基质柱对 COD 平均去除率分别达到 73% 和 69%, 其它基质柱都在 60% 左右. 对数据进行两两比较 (LSD), 结果如表 3, A 和 B、D、F、G、H 基质柱对 COD 平均去除率存在显著性差异.

2.3 各级配基质柱对氮素的去除

各基质柱对污水中的总氮和氨氮净化效果都存在显著性差异 (图 4、表 3), 其中 C、D 和 E 基质柱对

污水中氮素的处理效果均较好, 总氮平均去除率分别高达 91%、87% 和 88%, 氨氮平均去除率分别为 95%、95% 和 92%, 且处理效果稳定, 这 3 种级配基质对氨氮去除率高于总氮去除率, 两两之间不存在显著性差异. 其它 5 种级配基质对氮素的去除率在 20%~40% 之间, 且处理效果波动性较大, A 和 F 基质柱中氨氮去除率高于总氮去除率, B、G 和 H 基质

柱反之.除 E 基质柱出水中氮素主要是氨氮外,进水和它各基质柱处理出水中氮素主要由氨氮和有机氮组成(图 5),亚硝酸盐氮和硝酸盐氮含量均很低.

2.4 各级配基质柱对磷素的去除

各基质柱对污水中的总磷和可溶性反应磷净化效果都存在显著性差异(图 6、表 3),其中 B 和 G 基质柱对污水中磷素的处理效果均较好,总磷平均去除率分别高达 62% 和 84%,可溶性反应磷分别为 80% 和 87%,且处理效果稳定,这 2 种级配基质可

表 3 各基质柱对各污染物去除效果的方差分析¹⁾/%

Table 3 ANOVA analysis of removal rates of COD, N and P in the columns with different graded substrates/%

基质柱号	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	SRP
A	72.91 ± 15.82 a	25.31 ± 23.90 b	31.40 ± 29.62 b	37.72 ± 26.24 b	20.82 ± 36.74 b
B	60.38 ± 19.55 b	25.12 ± 20.48 b	20.97 ± 22.13 b	62.02 ± 28.40 ab	80.07 ± 17.41 a
C	62.72 ± 19.36 ab	91.23 ± 6.01 a	95.38 ± 2.54 a	33.26 ± 25.03 b	3.63 ± 40.84 b
D	54.00 ± 25.79 b	86.51 ± 12.11 a	95.35 ± 1.80 a	34.15 ± 26.00 b	7.08 ± 36.15 b
E	68.77 ± 16.60 ab	87.76 ± 6.48 a	92.11 ± 4.62 a	49.57 ± 31.54 b	31.72 ± 45.35 b
F	58.79 ± 20.19 b	26.23 ± 18.21 b	30.50 ± 28.93 b	37.33 ± 44.83 b	27.09 ± 49.15 b
G	60.34 ± 22.19 b	32.49 ± 21.93 b	19.50 ± 36.58 b	84.20 ± 7.44 a	87.49 ± 8.05 a
H	56.85 ± 25.58 b	37.60 ± 22.53 b	26.41 ± 17.48 b	40.47 ± 34.67 b	19.65 ± 48.85 b

1) 表内数据为“平均值 ± 标准偏差”;同一栏中数据标有相同字母的表示相互差异不显著($\alpha = 0.05$),COD 去除率的两两比较采用 LSD 法,其它均采用 Tamhane's T2 法

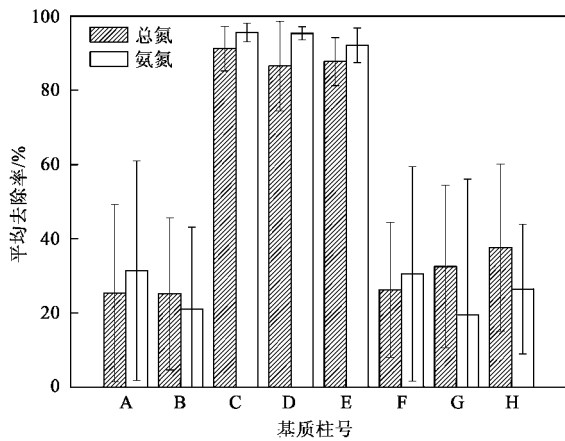


图 4 各基质柱对总氮和氨氮的平均去除率

Fig. 4 Average removal rates of TN and NH₄⁺-N in all columns

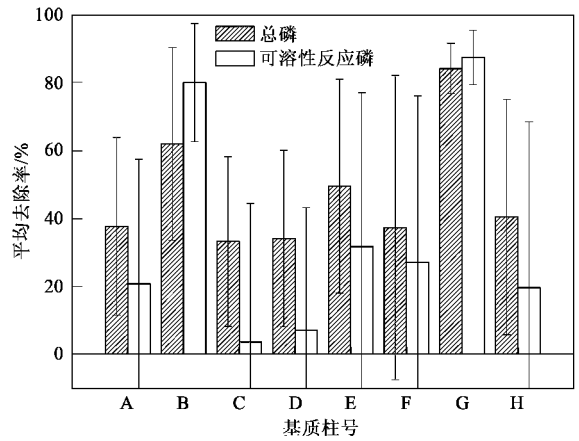


图 6 各基质柱对总磷和可溶性反应磷的平均去除率

Fig. 6 Average removal rates of TP and SRP in all columns

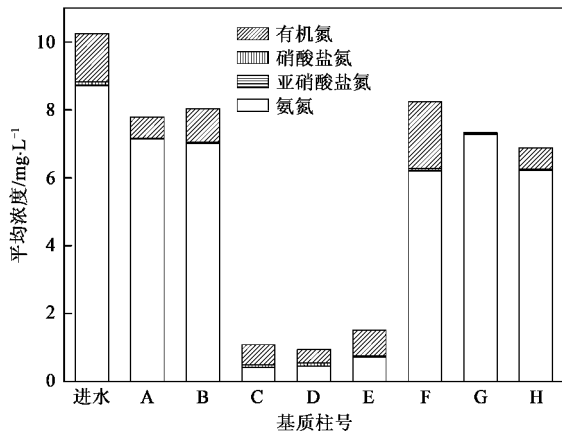


图 5 进水及各基质柱出水中氮的组成

Fig. 5 Average composition of N in the influent and effluents

溶性反应磷去除率高于总磷去除率,不存在显著性差异.其他 6 种级配基质对总磷的去除率在 30% ~ 50% 之间,对可溶性反应磷的去除率低于对总磷的去除率,其中 C 和 D 基质柱对污水中可溶性反应磷的处理效果均较差,平均去除率均在 10% 以下,且处理效果波动较大.从图 7 可以看出,除 B 基质柱外,各基质柱对颗粒磷都有一定的去除效果,同时 B 和 G 基质柱对污水中磷素的高效去除主要是对可溶性反应磷的去除.

3 讨论

3.1 基质粒径分层级配对污染物净化效果影响

A、B、C 和 D 基质柱均为同种基质不同粒径的

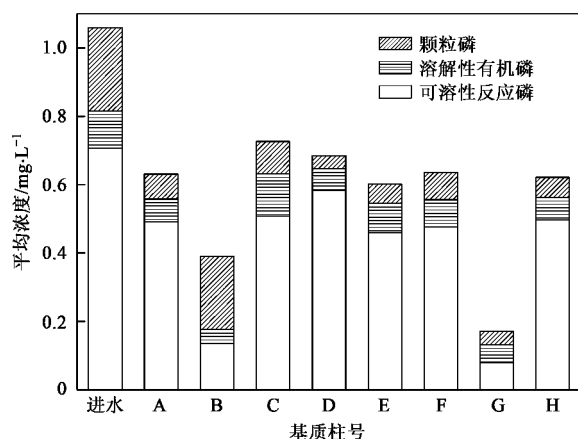


图7 进水及各基质柱出水中磷的组成

Fig.7 Average composition of N in the influent and effluents

组合。其中,根据粒径分层的生物陶粒对 COD、沸石对总氮和氨氮、无烟煤对总磷和可溶性反应磷的去除率分别高达 73%、91% 和 95%、62% 和 80%,生物陶粒、沸石和无烟煤分别对有机物、氮和磷具有较好的净化能力,与张翔凌等^[12]的研究结果一致。而粒径分层基质与单一粒径基质实验数据相比较可以看出,粒径分层基质对 COD 的去除率高于单一粒径基质,可能因为本试验中粒径分层基质柱上层基质粒径较小,因此其净化效果较好,其中无烟煤上层基质粒径与单一基质粒径相差较小,净化效果相差也较小。目前研究认为高分子量的有机污染物被降解成低分子量的营养物是由微生物新陈代谢和土壤酶完成的^[16],而细菌生理类群数量和酶活性均随着基质层深度的增加相对递减^[17],因此可认为基质柱对 COD 的去除主要发生在上层,上层基质粒径越小,比表面积越大,去除污染物的效果越好。分层沸石对总氮的去除率较单一粒径基质提高了 20% 左右,其他分层基质对氮磷的净化效果与单一粒径基质接近。Zhao 等^[18]研究比较了反级配分层砾石和单一粒径砾石的净化效果,认为两者对 COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和 TP 的去除率均相当接近。C 和 D 基质柱对有机物和氮磷污染物的净化效果都没有显著性差异,表明对本试验系统而言,种植植物对净化效果没有明显影响,此结论与 Langergraber 等^[19]的研究成果相符。

3.2 不同基质级配对污染物净化效果

E、F、G 和 H 基质柱均为不同基质级配基质柱。从表 3 可以看出,各组合基质柱对 COD 的去除效果都较好,其中填充了 30 cm 生物陶粒的 E 基质柱的平均去除率略高于 F、G 和 H 基质柱,同样填充了

30 cm 沸石的 E 基质柱对氮素有较好的净化能力,与分层沸石基质柱没有显著性差异。基质吸附和沉淀在人工湿地磷素的去除和固定机制中可能发挥着最重要的作用,同时也是最容易控制的因素^[9],基质中全钙、氧化钙、水溶性钙;游离氧化铁、铝和胶体氧化铁、铝含量越高,其固定生成的磷酸钙盐、磷酸铁盐和磷酸铝盐越多^[20]。而基质对磷的吸附能力的影响因素主要是吸附位和 pH 值^[5],如果磷酸盐是在低 pH 范围沉淀,则 FePO₄(s) 和 AlPO₄(s) 是稳定的固相,其最小溶解度出现的 pH 值分别为 5 和 6^[21];钙和磷酸盐可以生成几种不溶的固相,其中羟基钙磷灰石的平衡参数最大,是最稳定的固态磷酸盐,磷酸盐在碱性条件下与钙离子反应生成羟基钙磷灰石,且 pH 值越高反应越完全^[7]。F、G 和 H 基质柱以不同的方式组合了对磷净化效果较好的无烟煤和钢渣,其对于磷素的净化能力存在显著性差异,说明基质的组合方式也影响其对污染物的去除,黄逸群等^[22]的研究成果也表明不同体积比组合的粉煤灰、煤渣和空心砖对 COD、氮和磷的净化效果存在差异。E 基质柱只填充了 30 cm 无烟煤,其吸附点位明显减少,在 F 基质柱中,污水通过钢渣基质层时,钢渣表面的金属氧化物、氢氧化物与磷酸根离子的吸持反应(表面络合配位反应)引起体系 pH 值升高^[23],可能使得底层无烟煤中的胶体氧化铝难于与磷素生成稳定的固相^[24]。同时基质在某种程度上是作为一个“磷缓冲器”来调节进出污水中磷浓度的,那些吸附磷较少的基质也最容易释放磷^[25],E、F 基质柱中,污水经过中下层吸附磷较少的基质时,基质吸附的磷重新释放到水中。H 基质柱中,钢渣和无烟煤直接混合,其化学成分不同(如表 2)。张翔凌^[14]的研究成果表明单一钢渣和无烟煤基质柱出水总溶解性固体(TDS)分别比进水增加了 13 倍和 1 倍,说明这 2 种基质自身结构中的无机物均离解进入水中。而 H 基质柱出水 TDS(275 mg/L)略高于进水(248 mg/L),说明钢渣和无烟煤离解出的无机物发生化学反应,从而使两者对磷素的去除表现为拮抗作用。F、G 和 H 基质柱出水 pH 值均小于 9,达到城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002),基本解决了钢渣单独作为人工湿地基质出水呈强碱性的难题^[3, 26]。

4 结论

(1) 粒径分层级配基质对 COD 的去除率均高于单一粒径基质,其中分层生物陶粒对 COD 的平均

去除率高达 73%, 各组合基质对 COD 的去除率没有显著性差异. 分层沸石对总氮的去除率较单一粒径基质有所提高, 平均去除率高达 91%, 其他分层基质对氮磷的净化效果与单一粒径基质接近, 种植物和不种植物的分层沸石基质柱的出水 pH 值和净化效果没有显著性差异.

(2) 钢渣和无烟煤以各种方式组合, 出水 pH 值均正常, 但是只有从上到下依次填充无烟煤、蛭石和钢渣的基质柱对磷素的净化效果较好, 对总磷和可溶性反应磷的平均去除率分别达到 84% 和 87%. 填充了生物陶粒、沸石和无烟煤的基质柱对有机物和氮素的去除率高, 与单一基质没有显著性差异, 但对磷素的去除率低于单一无烟煤基质.

(3) 在高负荷垂直流人工湿地中, 针对水质特性选择级配基质. 当特征污染物为有机物时选用分层生物陶粒; 当特征污染物为氮时选用分层沸石; 当特征污染物为磷时选用分层无烟煤; 当所处理污水为含有有机物、氮和磷污染物的综合污水时, 选用生物陶粒、沸石和无烟煤组合, 可提高处理效果、减小人工湿地占地面积.

致谢: 张甬元先生、刘保元先生、成水平、梁威、周巧红、张丽萍和学科组其他成员在实验设计进行及文章修改过程中给予了帮助; 何流和丁伟等参加了部分实验数据测定, 在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Platzer C, Mauch K. Soil clogging in vertical flow reed beds—mechanisms, parameters, consequences and……solutions? [J]. *Water Sci Technol*, 1997, **35**(5): 175-181.
- [2] 吴振斌. 复合垂直流人工湿地 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 293-354.
- [3] 李怀正, 叶建锋, 徐祖信. 几种经济型人工湿地基质的除污效能分析 [J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(19): 27-30.
- [4] Drizo A, Frost C A, Smith K A, *et al.* Phosphate and ammonium removal by constructed wetlands with horizontal subsurface flow, using shale as a substrate [J]. *Water Sci Technol*, 1997, **35**(5): 95-102.
- [5] Gray S, Kinross J, Read P, *et al.* The nutrient assimilative capacity of maerl as a substrate in constructed wetland systems for waste treatment [J]. *Water Res*, 2000, **34**(8): 2183-2190.
- [6] Brooks A S, Rozenwald M N, Geohring L D, *et al.* Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate [J]. *Ecol Eng*, 2000, **15**: 121-132.
- [7] 叶建锋, 徐祖信, 李怀正, 等. 模拟钢渣垂直潜流人工湿地的除磷性能分析 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(9): 62-68.
- [8] Prochaska C A, Zouboulis A I. Removal of phosphates by pilot vertical-flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate [J]. *Ecol Eng*, 2006, **26**: 293-303.
- [9] Drizo A, Frost C A K, Grace J, *et al.* Physico-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. *Water Res*, 1999, **33**(17): 3595-3602.
- [10] Xu D F, Xu J M, Wu J J, *et al.* Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**: 344-352.
- [11] 谭洪新, 周琪, 杨殿海. 页岩-钢渣组合填料湿地强化脱氮除磷研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2182-2187.
- [12] 张翔凌, 张晟, 贺锋, 等. 不同填料在高负荷垂直流人工湿地系统中净化能力的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1905-1910.
- [13] 张翔凌, 吴振斌, 武俊梅, 等. 不同基质高负荷垂直流人工湿地水力特性研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2008, **30**(7): 79-83.
- [14] 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.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 210-285.
- [16] Shackle V J, Freeman C, Reynolds B. Carbon supply and the regulation of enzyme activity in constructed wetlands [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**: 1935-1940.
- [17] 周巧红, 吴振斌, 付贵萍, 等. 人工湿地基质中酶活性和细菌生理群时空动态特征 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 108-112.
- [18] Zhao Y Q, Sun G, Allen S J. Anti-sized reed bed system for animal wastewater treatment: a comparative study [J]. *Water Res*, 2004, **38**: 2907-2917.
- [19] Langergraber G, Haberl R, Laber J, *et al.* Evaluation of substrate clogging processes in vertical flow constructed wetlands [J]. *Water Sci Technol*, 2003, **48**(5): 25-34.
- [20] 袁东海, 景丽洁, 张孟群, 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.
- [21] 斯塔姆·W, 摩尔根·J·J, 著. 汤鸿霄, 等译. 水化学——天然水体化学平衡导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1987. 209-210.
- [22] 黄逸群, 张民, 徐玉新, 等. 人工湿地填料净化生活污水级配优化研究 [J]. *环境科学与技术*, 2009, **32**(3): 130-138.
- [23] House W A. The Physico-chemical conditions for the precipitation of phosphate with calcium [J]. *Environ Technol*, 1999, **20**(7): 727-733.
- [24] 张迎颖, 丁为民, 陈豪, 等. 人工湿地填料的静态吸附特性和动态除磷能力研究 [J]. *江苏农业科学*, 2009, **3**: 416-418.
- [25] Wang N M, Mitsch J W. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands [J]. *Ecol Model*, 2000, **126**: 101-130.
- [26] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 51-55.