

# 极浅型潜流人工湿地用于污水处理和 风沙土改良的中试研究

肖松丽<sup>1</sup>, 任勇翔<sup>1</sup>, 陈灿灿<sup>1</sup>, 高中秋<sup>1</sup>, 曹亚峰<sup>2</sup>, 王新伟<sup>3</sup>, 李榜晏<sup>1</sup>

(1. 陕西省环境工程重点实验室 西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055;

2. 陕西省建筑设计研究院, 陕西 西安 710018; 3. 大连都市发展设计有限公司, 辽宁 大连 116011)

**摘要:** [目的] 就利用极浅型潜流人工湿地同步处理污水和改良风沙土的可行性进行中试, 为后续相关工程的设计、建设和运行提供科学依据。[方法] 以污水处理厂初沉池出水为原水, 以取自毛乌素沙漠的风沙土为湿地填料, 以高羊茅、黑麦草和狗牙根为湿地栽培植物, 研究并分析湿地对水中污染物的去除效果和在水沙土的富集特征。[结果] 经过 15 个月的运行, 各湿地对污水中 COD、TN 以及 TP 的平均去除率分别高于原土 68.75%, 70.09% 和 62.74%。运行完毕后, 各湿地风沙土较原土有机质、全氮含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 全磷含量虽呈增加趋势但增幅不显著 ( $p > 0.05$ ), 其中风沙土有机质、全氮及全磷含量分别较原土增加了 10.64~18.77, 8.74~13.98, 0.34~0.55 倍。[结论] 利用极浅型潜流人工湿地同步处理污水和改良风沙土可行。它既能高效净化污水, 又可快速提升风沙土的生产力。

**关键词:** 极浅型潜流; 人工湿地; 污水; 风沙土改良; 物料平衡

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)02-0120-05

**中图分类号:** S156.5

**文献参数:** 肖松丽, 任勇翔, 陈灿灿, 等. 极浅型潜流人工湿地用于污水处理和风沙土改良的中试研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 120-124. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.023

## A Pilot Study on Purification of Wastewater and Amelioration of Aeolian Sandy Soil Using Extremely Shallow Subsurface Flow Constructed Wetland

XIAO Songli<sup>1</sup>, REN Yongxiang<sup>1</sup>, CHEN Cancan<sup>1</sup>,

GAO Zhongqiu<sup>1</sup>, CAO Yafeng<sup>2</sup>, WANG Xinwei<sup>3</sup>, LI Bangyan<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shaanxi Architectural Design Institute,

Xi'an, Shaanxi 710018; 3. Dalian Urban Development Design Co. Ltd., Dalian, Liaoning 116011, China)

**Abstract:** [Objective] A pilot study using extremely shallow subsurface flow of constructed wetlands for treating wastewater and amelioration of aeolian sandy soil was simultaneously carried out, in order to give scientific bases for the design, construction and operation of related works. [Methods] Raw water was drawn from a primary sedimentation in a municipal wastewater treatment plant. The aeolian sandy soil taken from the Mu Us Desert was used as the substrate of constructed wetlands in which *Festuca arundinacea*, *Lolium perenne* and *Cynodon dactylon* were cultivated respectively. The removal efficiency of pollutants by wetland subsurface flow and the enrichment of flow-carried nutrients in the cultivation soil were studied. [Results] After 15 months' operation, the minimum removal rates of COD, TN and TP of all wetlands were 68.75%, 70.09% and 62.74%, respectively. Organic matter and TN content in substrate of wetlands increased significantly ( $p < 0.05$ ) as compared with the corresponding values of the raw soil. TP content in substrate also got increased but was not pronounced ( $p > 0.05$ ). Organic matter, TN and TP content increased 10.64 to 18.77,

收稿日期: 2015-02-04

修回日期: 2015-05-19

资助项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目“人工湿地修复荒漠化土地可行性及关键技术研究”(20126120110017); 住房和城乡建设部科学技术计划项目“以建筑垃圾为填料的高溶解氧型人工湿地工艺的开发与理论研究”(2012-k7-21)

第一作者: 肖松丽(1990—), 女(汉族), 河南省许昌市人, 硕士研究生, 研究方向为污水生物处理理论研究。E-mail: 716699602@qq.com。

通信作者: 任勇翔(1968—), 男(汉族), 陕西省铜川市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境生态生物修复理论与技术方面的研究。E-mail: ryx@xauat.edu.cn。

8.74 to 13.98, and 0.34 to 0.55 times against the indices of raw soil, respectively. [Conclusion] It is feasible for using the extremely shallow subsurface flow of constructed wetland to simultaneously treat wastewater and amelioration of aeolian sandy soil, it can not only effectively purify wastewater but also can rapidly improve the fertility of aeolian sandy soil.

**Keywords:** extremely shallow subsurface flow; constructed wetlands; sewage; amelioration of aeolian sandy soil; material balance

风沙土是在风沙母质上发育形成的一种幼年土壤,它是沙漠化过程的产物<sup>[1]</sup>。对风沙土的改良和合理利用多年来一直是农业发展的重要研究内容。以往的风沙土改良方式通常是依靠投加大量的有机物,通过有机物的增加来提高风沙土保蓄养分的能力和土地的生产力<sup>[2-3]</sup>。以往研究中所选用的风沙土改良剂有煤矸石、泥炭和酒精废渣等材料<sup>[4-5]</sup>,而以源源不断的污水作为风沙土改良的稳定的水源和肥源的研究尚未见报道。随着我国城镇化进程的不断深入,城镇人口不断增多,沙漠化区域周边城镇的生活污水发生量也不断增加,若不及时有效处理将可能危及城镇周边脆弱的生态环境。人工湿地是当前常用的污水处理方法之一,已有研究<sup>[6]</sup>证明以取自毛乌素沙漠的风沙土为填料的极浅型潜流湿地,既可稳定去除水中的污染物,亦可将污水中的有机物和植物营养元素富集在风沙土中,并形成稳定植被。因此,本研究对以风沙土为填料的极浅型潜流湿地净化污水的稳定性和改良风沙土时营养物质的富集特性进行中试,旨在为后续相关工程的设计、建设和运行提供科学依据。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置

试验采用极浅型潜流湿地,详细结构与参数见前期研究成果<sup>[7]</sup>。湿地位于西安市某污水处理厂内,填料床深均为 0.1 m,运行水位均为 0.08 m。进水来自污水厂初沉池末端,试验期间进水水质条件为:浊度:130~280 NTU,化学需氧量(COD):100~270 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ :26~60 mg/L, TN:35~65 mg/L, TP:2.8~9.7 mg/L, pH 值:7.1~8.4,溶解氧(DO):0~0.93 mg/L, T:4~30 °C。填料为取自毛乌素沙漠的风沙土,先过 2 mm 筛网以去除大粒径的砾石,其组成主要为细沙(占 90%以上),粉沙含量极少,不含粗沙。原土(MS)中有机质、全氮和全磷含量为 0.43,0.12 和 1.05 g/kg。湿地系统共 3 块,面积均为 4 m<sup>2</sup>,栽培植物为高羊茅、黑麦草和狗牙根,分别编号为 CW<sub>1</sub>,CW<sub>2</sub> 和 CW<sub>3</sub>。高羊茅和黑麦草取自污水厂绿化草坪,狗牙根取自渭河滩沙地,移植时根上长度为 10 cm,根系长度为 5 cm,每块湿地种植 200~300 棵。高羊茅、黑麦草和狗牙根均是多年生

植物,其中高羊茅和黑麦草冬季常绿,狗牙根枯死期为 100 d。研究期间,植物生长状况优于陆生对照组,尤其是根系形成了类似棕床垫式的密网结构,根系密度为陆生对照组的 1.1~2.4 倍。2013 年 8 月至 2014 年 7 月,进水水力负荷为 0.007 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d);2014 年 8 月至 2014 年 10 月 CW<sub>1</sub> 和 CW<sub>2</sub> 水力负荷分别变为 0.015,0.01 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),试验采用间歇进水方式运行。

### 1.2 测试项目和分析方法

定期采集人工湿地进出水水样,水质指标为 COD, TN, TP 和固体悬浮物浓度(SS)等,测定方法参照《水与废水监测分析方法》<sup>[7]</sup>。土壤测定指标为有机质、全氮和全磷,植物测定指标为全氮和全磷,其测定方法均参照《土壤农化分析》<sup>[8]</sup>。水样每周取样 1~2 次,遇雨天隔天取样分析;土壤取样间隔 15~20 d,植物每半个月取样一次,每次沿水流方向在湿地的前中后 3 个位置取平行样后求均值。统计分析采用 Excel 和 SPSS 17.0,多个样本的平均数比较选用最小显著差法( $p=0.05$ )。

## 2 结果及分析

### 2.1 湿地进出水水质

由图 1 可知,各湿地出水 COD, TN, TP 浓度显著低于进水(均为  $p=0.00<0.05$ ),说明以风沙土为填料的极浅型湿地对污染物有较好的去除效果。各湿地出水 COD 浓度间无显著差异( $p=0.863>0.05$ ), TN, TP 浓度间差异显著( $p=0.00, 0.004<0.05$ ),表明植物种类对 TN, TP 去除效率有显著影响,对 COD 去除效率无显著影响。CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 出水的 COD, TN 以及 TP 平均浓度分别低于 61.73, 15.68 和 2.86 mg/L,平均去除率分别高于 68.75%, 70.09%和 62.74%。CW<sub>2</sub> 对 COD, TN 和 TP 的去除效果最佳,平均去除率分别为 72.41%, 84.53%和 76.31%。水力负荷的改变对 COD 去除效率无显著影响( $p=0.24>0.05$ ),对 TN, TP 有显著影响(均为  $p=0.00<0.05$ )。夏、秋季各湿地出水 COD, TN 浓度均满足《城镇污水处理厂排放标准》(GB18918-

2002)》I 级 A 标准,春、冬季多可达到 II 级标准。另外,由图 1 还可看出,冬季时尤其是 1 月,因西安市气温最低(平均温度为 $-1.2\sim 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),此时微生物的活性最弱<sup>[9]</sup>,导致出水中 COD 和 TN 浓度升高。春季各湿地出水 COD、TN 和 TP 浓度均较高,这主要与随着气温升高,植物残体腐烂间接提高了系统负荷

有关。各湿地出水的 TP 浓度仅在运行的前 4 个月可达到 I 级 A 排放标准,随着运行时间的延长,出水 TP 逐渐升高,因湿地对磷的去除主要缘于填料和固态有机质的吸附作用,表明风沙土对磷的富集作用有限。为满足湿地 TP 达标排放,可考虑多个湿地的串联运行或对 TP 进行单独处理,如吸附除磷等。

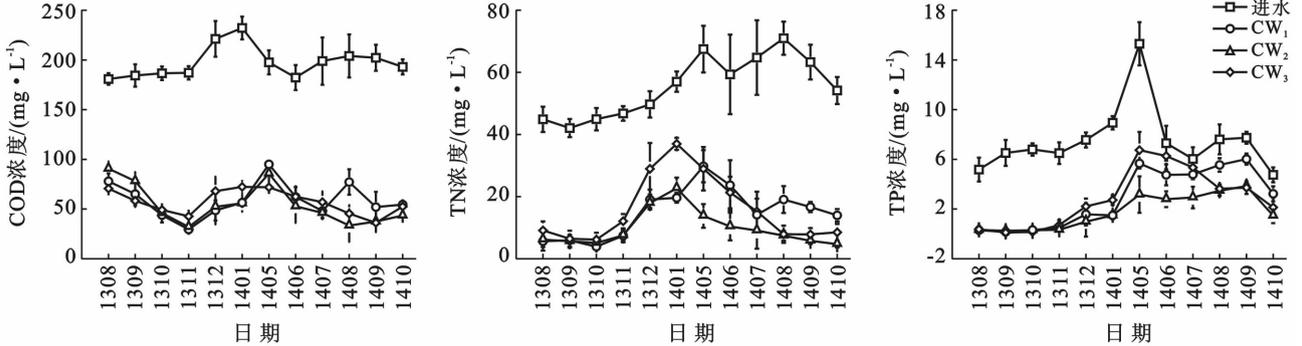


图 1 各湿地进出水 COD、TN 与 TP 浓度变化

注:处理编号 CW<sub>1</sub>、CW<sub>2</sub> 和 CW<sub>3</sub> 分别表示栽培植物为高羊茅、黑麦草和狗牙根。下同。

## 2.2 风沙土中营养物质的富集

土壤有机质是指存在于土壤中的所含碳的有机物质,包括动植物残体、微生物体及其分解和合成的各种有机质<sup>[10]</sup>。它是土壤的主要组成物质基础,是植物矿质营养和有机营养的重要源泉,它直接影响土壤的保水保肥性、供肥耐肥性,是土壤良好的缓冲剂<sup>[11]</sup>。由图 2 可知,CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中有机质含量较 MS 增加了 10.64~18.77 倍(均为  $p=0.00<0.05$ ),表明湿地在运行过程中,有机质含量显著增加。CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中有机质含量无显著性差异( $p=0.643>0.05$ ),表明植物种类对有机质含量无显著影响。水力负荷的改变对有机质含量无显著影响( $p=0.29>0.05$ ),但有机质净增量随着水力负荷的增加而增大。因此,在保证湿地出水水质的前提下,应适当增加水力负荷,从而达到快速改良风沙土的目的。试验 15 个月后,风沙土中有机质含量从 0.43 g/kg 增加到 4.97 g/kg 以上,明显优于风沙土中加入比例为 4% 的腐泥 75 d 后有机质含量的改变(从 0.22 g/kg 增加到 1.02 g/kg)<sup>[12]</sup>,而本研究有机质含量累积到此水平仅需 1 个月,表明极浅型潜流湿地利于风沙土中有机质的快速富集。

全氮包括有机氮和无机氮两种形式,它是土壤肥力的重要标志,是湿地土壤氮素总量和供给植物有效氮素的主要来源,综合反映了土壤氮素的潜在供应能力<sup>[13]</sup>。由图 2 可知,CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中全氮含量较 MS 增加了 8.74~13.98 倍( $p=0.004,0.005,0.04<0.05$ ),表明湿地在运行过程中,全氮含量显著增加。CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中全氮含量无显著性差异( $p=0.591>0.05$ ),表明植物种类对全氮含量无显著

性影响。水力负荷的改变对全氮含量无显著影响( $p=0.216>0.05$ ),但全氮净增量随着水力负荷的增加而增加。CW<sub>1</sub> 和 CW<sub>2</sub> 风沙土中全氮含量达到土壤养分等级的 II 级标准(1.5~2 g/kg),CW<sub>3</sub> 达到 III 级标准(1.1~1.5 g/kg)<sup>[14]</sup>。试验 15 个月后,风沙土中全氮含量从 0.12 g/kg 增加到 1.17 g/kg 以上,明显优于通过农田耕作方式改良风沙土 4 a 后全氮含量的改变(从 0.15 g/kg 增加到 0.21 g/kg)<sup>[15]</sup>,而试验中风沙土全氮含量累积到此水平仅需 2 个月,表明极浅型潜流湿地利于风沙土中全氮的快速富集。

全磷包括有机磷和无机磷两种形式,在土壤形成过程中,磷的风化、淋溶和富集迁移是多重因素的共同的结果,其中生物的富集迁移是磷素累积的主导型因素<sup>[16]</sup>。由图 2 可知,CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中全磷含量较 MS 增加了 0.34~0.55 倍,亦即无显著影响( $p=0.073,0.182,0.128>0.05$ ),表明湿地在运行过程中,全磷含量虽有增加但较原土差异不显著。CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中全磷含量无显著性差异( $p=0.912>0.05$ ),表明植物种类对全磷含量无显著影响。水力负荷的改变对全磷含量无显著影响( $p=0.388>0.05$ ),但全磷净增量随着水力负荷的增加而增加。虽然磷在实际富集过程中由于易淋溶等特点,导致其富集速率较慢,但与其他改良方式相比,湿地系统在运行 15 个月后,风沙土中全磷含量从 1.05 g/kg 增加到 1.40 g/kg 以上,明显优于通过农田耕作方式改良风沙土 4 a 后全磷含量的变化(由 0.66 g/kg 增加到 0.92 g/kg),表明极浅型潜流湿地可实现风沙土中全磷的快速富集。

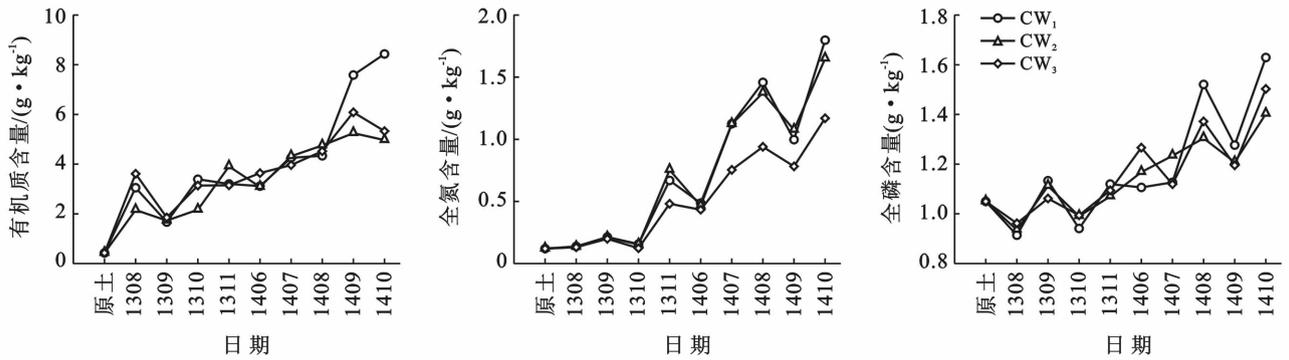


图2 各湿地风沙土中有机质、全氮与全磷含量变化

### 2.3 湿地中碳氮磷物料平衡分析

试验期间(2013年8月至2014年10月),湿地中有机物的去除主要依靠风沙土的物理化学作用和异养型微生物的降解作用。氮的去除主要依靠风沙土吸附、植物吸收、微生物硝化反硝化作用以及氨的挥发<sup>[17]</sup>,由于湿地pH值小于8.0,氨的挥发作用可不计<sup>[18]</sup>。磷的去除主要依靠风沙土吸附、沉淀、过滤、植物直接吸收利用以及微生物作用。由此可建立如下的碳、氮和磷的迁移转化模型:进入系统的碳=风

沙土富集+微生物降解作用+出水中的碳;进入系统的氮=植物吸收同化+风沙土富集+微生物硝化反硝化+出水中的氮;进入系统的磷=植物吸收同化+风沙土富集+微生物同化作用+出水中的磷。湿地系统碳、氮以及磷的进水总负荷及各种转化途径(表1)。由表1可知,CW<sub>2</sub>出水COD,TN和TP浓度最低,微生物的降解作用最强,对污水中污染物的去除效果最佳。CW<sub>1</sub>风沙土中有机质、全氮和全磷的富集量最大,利于风沙土的改良。

表1 不同湿地中的物料平衡分析

mg/(m<sup>2</sup>·d)

肥分	湿地	进入湿地的负荷	污染物转化途径			
			出水	植物吸收	风沙土富集	微生物作用
C	CW <sub>1</sub>	1 675.18	523.47	—	626.56	525.15
	CW <sub>2</sub>	1 532.50	422.88	—	368.42	741.20
	CW <sub>3</sub>	1 461.23	423.41	—	391.82	646.00
N	CW <sub>1</sub>	514.94	154.00	19.35	131.26	210.33
	CW <sub>2</sub>	441.97	77.20	37.74	124.19	202.84
	CW <sub>3</sub>	405.45	115.56	33.84	85.62	170.43
P	CW <sub>1</sub>	63.34	23.60	1.64	30.19	7.91
	CW <sub>2</sub>	55.54	12.87	4.18	28.57	9.92
	CW <sub>3</sub>	51.64	19.12	5.86	24.65	2.01

由图3可知,不同有机物去除途径占湿地进水总负荷的比率中,CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub>风沙土富集作用约占24.04%~37.40%,微生物降解作用约占31.35%~48.37%,出水约占27.59%~31.25%。其中CW<sub>1</sub>风沙土富集作用是有机物去除的主要途径,而CW<sub>2</sub>和CW<sub>3</sub>中则是微生物的降解作用为主,这是因为CW<sub>1</sub>在加大水力负荷后,湿地前端出现漫流现象,更有利于水中悬浮固体的沉积。不同氮去除途径占湿地进水全氮负荷的比率中,CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub>风沙土富集作用约占21.12%~28.10%,植物吸收作用约占3.76%~8.54%,微生物硝化反硝化作用约占40.85%~45.89%,出水约占17.47%~29.91%,表明微生物的硝化反硝化作用是湿地脱氮的主要途径,

其次是风沙土富集作用。不同磷去除途径占湿地进水全磷负荷的比率中,CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub>风沙土富集作用约占47.66%~51.44%,植物吸收作用约占2.59%~11.35%,微生物作用约占3.89%~17.86%,出水约占23.17%~37.26%,表明风沙土富集作用是湿地系统除磷的主要途径。

## 3 结论

(1) 经过试验装置15个月的连续运行结果表明,以风沙土为填料的极浅型潜流人工湿地既可实现对污水中污染物的净化,又可快速实现风沙土的改良,既利于降低污水处理的成本,又利于提高风沙土抗风蚀的能力。

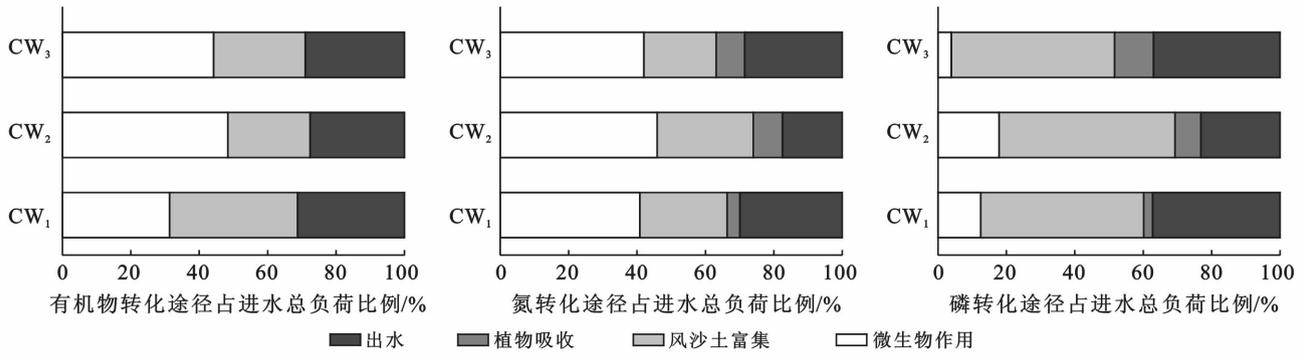


图3 湿地污染物不同去除途径占进水总负荷的比率

(2) 对 COD, TN 以及 TP 的去除虽呈现季节性变化, 但平均去除率分别高于 68.75%, 70.09% 和 62.74%, 以黑麦草为栽培植物的湿地对 TN 和 TP 的去除显著优于高羊茅和狗牙根湿地。

(3) 与原土相比, CW<sub>1</sub>—CW<sub>3</sub> 风沙土中有机质、全氮含量显著增加 ( $p < 0.05$ ), 全磷含量虽呈增加趋势但差异性不显著 ( $p > 0.05$ ); 有机质、全氮以及全磷含量分别增加了 10.64~18.77 倍, 8.74~13.98 倍, 0.34~0.55 倍。高羊茅湿地中风沙土表现出更好的对氮磷的富集作用, 若考虑同步净化污水, 可与黑麦草混种。

#### [参 考 文 献]

- [1] 石辉, 吴金水, 陈占飞. 陕北沙区不同利用方式风沙土的营养特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 385-389.
- [2] 王晓娟, 金木梁, 周玉麟. 黄淮海平原沙地不同治理利用措施下土壤性质的差异[J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 289-292.
- [3] 段争虎, 肖洪浪. 流沙和改良后土壤无机磷形态分级及其有效性研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 195-199.
- [4] 高国雄, 李广毅, 高宝山, 等. 煤矸石障蔽对沙地土壤的改良作用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 102-104.
- [5] 崔建垣, 李玉霖, 苏永中. 经发酵的酒精废渣用于沙地改良的试验研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 368-371.
- [6] 王新伟, 任勇翔, 曹亚锋, 等. 细沙作为极浅型潜流人工湿地填料的可行性研究[J]. 水处理技术, 2015(1): 120-123.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] 崔玉波, 郭智情, 姜廷亮. 低温下人工湿地去除营养物的机理与效能[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(1): 121-125.
- [10] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [11] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(1): 1-9.
- [12] 马云艳, 赵红艳, 严啸, 等. 泥炭和腐泥改良风沙土前后土壤理化性质比较[J]. 吉林农业科学, 2009, 34(6): 40-44.
- [13] 李金芬. 云雾山草地土壤有机碳全氮含量与分布特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [14] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 北京: 农业出版社, 1979.
- [15] 冯起. 半湿润地区改良风沙土土壤性质研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(4): 1-6.
- [16] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2004, 22(1): 1-5.
- [17] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2677.
- [18] 周艳丽, 余宗莲, 孙文杰. 水平潜流人工湿地脱氮除磷研究进展[J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 42-48.