

5 种湿地植物对生活污水净化效果研究

李龙山^{1,2}, 倪细炉², 李志刚², 李 健^{2*}

(1 宁夏大学 生命科学学院, 银川 750021; 2 宁夏林业研究所种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750004)

摘 要: 选择芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草、长苞香蒲 5 种常见湿地植物分别构建人工湿地小试系统, 测试它们对生活污水的净化作用, 分析污水净化过程中氮磷元素在植物体内和土壤中的动态分布, 以明确各湿地植物对污水的综合净化能力。结果表明: (1) 5 种湿地植物对生活污水中的 COD_{Cr}、铵态氮、总氮和总磷的去除效果显著高于无植物对照; 随处理时间延续, 污水中 COD_{Cr}、铵态氮、总氮和总磷浓度均呈下降趋势, 定植土壤中的总氮和总磷含量呈先上升后下降的变化趋势。 (2) 5 种植物能够吸收污水中 89.7%~97.9% 的磷元素, 污水中剩余的磷元素量较少 (2.1%~10.3%); 污水中氮元素在植物体、污水和土壤中分布因植物种类不同有很大差别, 芦苇、水葱和长苞香蒲可吸收污水中 76.1%~83.4% 的大部分氮元素, 而千屈菜和扁秆藨草对氮元素吸收量较少 (分别为 45.0% 和 46.8%), 在污水和土壤中滞留的氮元素较多 (21.7%~31.6%)。 (3) 5 种植物对氮元素的积累能力显著大于对磷元素的积累能力; 5 种湿地植物对生活污水的综合净化能力差异较大, 从强到弱依次为芦苇>长苞香蒲>水葱>扁秆藨草>千屈菜。

关键词: 污水净化; 湿地植物; 人工湿地

中图分类号: Q948.116

文献标志码: A

Sewage Cleaning Abilities of Five Wetland Plants

LI Longshan^{1,2}, NI Xilu², LI Zhigang², LI Jian^{2*}

(1 College of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 State Key Laboratory of Seedling Bio-engineering, Yinchuan 750004, China)

Abstract: The sewage cleaning ability of 5 wetland plants, including *Phragmites australis*, *Scirpus validus*, *Lythrum salicaria*, *Scirpus planiculmis* and *Typha angustata*, were compared in constructed wetland simulated for domestic sewage treatment. The results demonstrated that: (1) The treatment system with wetland plants has higher removal efficiency to COD_{Cr}, ammonia nitrogen (NH₄⁺-N), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) than that without wetland plants ($P < 0.05$). The removal efficiency of 5 wetland plants were determined that ranged 80.2%~88.5%, 98.4%~99.3%, 68.8%~83.8%, 89.7%~97.2% for COD_{Cr}, NH₄⁺-N, TN and TP, respectively. (2) The five wetland plants absorbed most of the phosphorus in sewage (89.7%~97.9%), and the surplus in sewage were very little (2.1%~10.3%). There was no retention in soil. The distribution of total nitrogen in sewage, plants and soils have very big difference. The total nitrogen absorption of *P. australis*, *S. validus*, *T. angustata* were higher (76.1%~83.4%) than that of *L. salicaria*, *S. planiculmis* (45.0%, 46.8%). (3) For these 5 wetland plants, the ability of nitrogen accumulation is higher than that of phosphorus accumulation. The 5 wetland plants showed a distinct phosphorus and ammonium-nitrogen removal. The results of principal component analysis shows that *P. australis*, *T. angustata* and *S. validus* are the better ones among the five wetland plants in experiment of domestic sewage clean, followed by *L. salicaria* and *S. planiculmis*.

收稿日期: 2013-08-12; 修改稿收到日期: 2013-09-30

基金项目: 国家国际科技合作专项项目 (2011DFG32780); 宁夏重大科技攻关项目

作者简介: 李龙山 (1988—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事湿地植物净化污水和环境微生物方面的研究。E-mail: llongshan@yahoo.com

* 通信作者: 李 健, 研究员, 主要从事林业生态学领域研究。E-mail: nixilu110@163.com

Key words: sewage clean; wetland plants; constructed wetland

随着中国城镇化、工业化和经济的快速发展,对水资源的需求日益增大。由于水资源本身的分配不平衡以及严重的水资源污染,导致各地不同程度的水资源短缺问题,因而水资源的循环利用和水污染处理技术越来越受到人们的重视^[1-3]。1953 年德国 Seidel 博士研究发现,芦苇能去除大量有机和无机物^[4],随后 Seidel 与 Kickuth 合作,并由 Kickuth 于 1972 年提出了根区理论^[5],该理论的提出掀起了人工湿地研究与应用的热潮,国内外学者就湿地植物^[6]、湿地基质^[7-8]、湿地工艺参数^[9-10]等方面对人工湿地的运行特性及处理效果进行了广泛研究。近年来,人工湿地因其建造及运行费用低、净化效果好、维护简单等特点,被广泛用于处理生活污水^[11]、河流污染^[12]、工业污水^[13]和养殖废水^[14]等。人工湿地污水处理技术是选用净化能力较强的湿地植物,由人工建立的具有湿地性质的污水处理生态系统,通过湿地植物的直接吸收、土壤的过滤、吸附、沉淀、离子交换以及微生物分解来实现对污水的高效净化。目前人工湿地处理污水的研究较多,所选择的植物各异。其中对芦苇(*Phragmites australis*)、水葱(*Scirpus validus*)、香蒲(*Typha angustata*)等植物因其生长期长、生物量大、生命力强适宜于构建人工湿地而倍受人们关注^[15]。

宁夏地处黄河流域,年均降水量在 400 mm 左右。宁夏沿黄河地区饮用水、农田灌溉水和工业用水等均来自于黄河,随着宁夏沿黄河流域城市带的建设,水资源的需求量激增,又因不合理的水资源利用方式和各类污水的乱排乱放,造成湖泊和黄河支流不同程度的污染^[16]。因此,本研究选用宁夏黄河流域分布较广的芦苇、水葱、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、扁秆藳草(*Scirpus planiculmis*)和长苞香蒲共 5 种湿地植物,模拟人工湿地污水处理小试系统,研究污水处理过程中污染的动态变化及氮磷元素动态分布,以进一步分析人工湿地净化污水机理,为在宁夏构建和运行人工湿地提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为野外采集的芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藳草和长苞香蒲 5 种湿地植物。试验开始前将部分幼苗带回实验室杀青并烘干用于生物量和总磷、总氮的测定,另一部分幼苗栽培于装有土壤的水桶

中(桶高 34 cm,上口直径 34 cm,下口直径 27 cm),5 种湿地植物单独种植,每桶种植 3 株,每种植物种植 3 桶,浇灌自来水进行适应性生长,待其生长健壮后(苗龄 2 个月)抽走水桶中的自来水,浇灌污水开始试验。试验中用于定植植物的土壤为银川植物园试验田砂质土,采集于同一地点,过 10 目筛后混匀分装于各桶中。土壤总氮含量为 $(0.43 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,总磷含量为 $(0.59 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验地位于宁夏银川市植物园实验大棚,自然光照。设 CK₁(污水静置)、CK₂(土壤和污水静置)为对照;5 种湿地植物单独种植,每桶种植 3 株,浇灌污水为处理,对照和处理各设 3 次重复。试验用污水取自宁夏银川市六盘山高级中学南侧校园的排水沟,为教职工生活区排放的生活污水。试验开始前,对污水水质指标进行测定,作为初始浓度,其中的 COD_{Cr} 为 $(192 \pm 6.24) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)为 $(1.256 \pm 0.29) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,总氮(TN)为 $(34.50 \pm 3.08) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,总磷(TP)为 $(1.46 \pm 0.13) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,pH 为 (9.57 ± 0.31) 。污水浇灌量为每桶 10 L,水深为 12 cm,标记每个桶的水面,以之作为标准,通过加自来水补充试验期间的蒸发和蒸腾所耗水分,以保持桶中水位。

试验过程中水样和土壤样品的采集分为短期和长期两个阶段,短期(7 月)每隔 6 d 采集 1 次样品,长期(7~10 月)每月采集 1 次样品,试验期间共采集 7 次。采样在上午 8:00~9:00 进行。水样采集:用注射器抽取水面下 6 cm 处水样 80 mL,尽快进行水质分析。土壤样品采集:用采泥器旋转采集 1~10 cm 泥样,充分混匀,风干待测。试验于 2012 年 7 月 5 日开始至 2012 年 10 月初结束。试验结束后采集整株植物,用于生物量和总氮、总磷的测定。

1.3 指标测定^[17-18]

水样中 COD_{Cr}、总磷(TP)和铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的浓度采用德国 Merck 公司生产的光电比色计(Spectroquant NOVA60)进行测定;水样中总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;水样 pH 采用 PHS-3C 型 pH 计测定。土壤总氮、总磷含量测定参考《土壤理化分析实验指导》;植物体总氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮滴定法测定,总磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮钼锑抗比色法测定。

1.4 数据处理和相关公式^[19]

用 Excel 作图, SPSS 17.0 进行统计分析, 用 Tukey HSD 法进行多重比较; 用 SPSS 17.0 进行主成分分析。结果用平均值±标准误差表示。

去除率(%) = $\frac{\text{水样初始浓度} - \text{取样浓度}}{\text{水样初始浓度}} \times 100\%$

植物对氮磷的累积量(mg) = 植物最终氮磷含量 × 生物量 - 植物初始氮磷含量 × 生物量

植物氮磷的累积能力(mg · g⁻¹) = $\frac{\text{植物对氮磷的累积量}}{\text{植物生物量净增长}}$

污水中总的氮磷去除量(mg) = 污水中氮磷总量(mg) × 去除率(%)

2 结果与分析

2.1 各植物对污水的净化效果比较

2.1.1 CODcr 去除率 从表 1 可看出, 与污水静置(CK₁)和无植物对照(CK₂)相比, 各植物对污水中 CODcr 的去除效果明显, 并达到显著水平($P < 0.05$)。随试验时间的延续, 各植物对水体中 CODcr 去除率呈现出先逐步上升, 后又缓慢下降的趋势, 但始终高于两个对照。其中, 至 8 月 5 日(试验第 30 天)各植物所处水体中 CODcr 的浓度由 192 mg · L⁻¹

大幅降至 8~19 mg · L⁻¹, 此时, 芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲对污水中 CODcr 去除率达到最高值, 分别为 95.8%、95.1%、90.1%、93.2% 和 95.1%; 9~10 月份去除率又出现下降趋势。各植物对污水中 CODcr 的去除速度不尽相同, 如处理第 6 天芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲水体中 CODcr 去除率分别达到 65.1%、71.2%、59.9%、52.6% 和 76.2%, 以长苞香蒲最大, 芦苇和水葱次之, 千屈菜和扁秆藨草较低, 且植物间差异显著。

2.1.2 NH₄⁺-N 去除率 从表 2 可看出, 随试验时间延续, 试验中各植物对水体中 NH₄⁺-N 去除率呈现先迅速上升后保持稳定的趋势。其中, 试验前期各植物对污水中 NH₄⁺-N 去除效果极为明显, 在 7 月 23 日(试验第 18 天)芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲对水体中 NH₄⁺-N 的去除率分别达到 91.9%、99.4%、97.0%、97.9%、99.2%; 各种植物对污水中 NH₄⁺-N 的去除速率均显著高于污水静置(CK₁)和无植物对照(CK₂)。以上结果说明各植物均能有效去除污水中铵态氮, 并以水葱和长苞香蒲的去除效果较好。

2.1.3 总氮去除率 从表 3 可知, 随实验时间延

表 1 5 种湿地植物对污水中 CODcr 的去除效率
Table 1 Removal rate of CODcr in the sewage by five wetland plants/%

日期 Date	CK ₁	CK ₂	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	水葱 <i>Scirpus validus</i>	千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i>	扁秆藨草 <i>Scirpus planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>Typha angustata</i>
7 月 11 日 Jul. 11	30.2±3.2 g	44.4±1.8 f	65.1±1.3 d	71.2±2.0 b	59.9±1.4 c	52.6±1.3 e	76.2±2.2 a
7 月 17 日 Jul. 17	52.1±2.4 d	65.3±1.7 c	84.2±2.9 a	80.0±3.9 a	71.0±2.2 b	71.7±2.3 b	79.2±4.5 a
7 月 23 日 Jul. 23	55.2±3.1 d	71.2±0.8 c	87.0±0.9 a	74.0±4.3 c	72.6±4.5 c	80.9±3.5 b	72.9±4.3 c
7 月 29 日 Jul. 29	61.5±2.0 c	69.8±2.5 b	85.2±2.3 a	82.5±3.2 a	79.9±3.9 a	79.7±4.5 a	85.2±4.0 a
8 月 5 日 Aug. 5	60.8±1.8 d	81.3±0.2 c	95.8±0.1 a	95.1±0.2 a	90.1±0.1 b	93.2±0.5 b	95.1±1.2 a
9 月 5 日 Sept. 5	59.7±1.7 f	81.8±0.2 e	88.5±0.1 c	93.8±0.4 a	83.3±0.1 d	89.1±1.2 b	90.1±0.9 b
10 月 5 日 Nov. 5	58.3±4.9 d	77.1±0.1 c	88.5±0.05 a	80.7±0.2 b	80.2±0.2 b	80.7±0.4 b	83.9±2.2 b

注: 同行不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异; 下同。
Note: The different normal letters in the same row indicate significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

表 2 5 种湿地植物对污水 NH₄⁺-N 的去除率
Table 2 Removal rate of NH₄⁺-N in the sewage by five wetland plants/%

日期 Date	CK ₁	CK ₂	芦苇 <i>P. australis</i>	水葱 <i>S. validus</i>	千屈菜 <i>L. salicaria</i>	扁秆藨草 <i>S. planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>T. angustata</i>
7 月 11 日 Jul. 11	17.1±3.1 f	37.4±3.4 e	46.0±4.7 d	69.3±1.9 a	62.1±1.4 b	53.2±3.6 c	66.7±2.8 a
7 月 17 日 Jul. 17	42.7±3.1 d	64.5±5.0 c	87.0±5.7 ab	94.4±4.1 a	81.3±1.8 b	86.7±4.1 ab	91.0±1.8 a
7 月 23 日 Jul. 23	52.6±5.0 d	75.3±4.4 c	91.9±4.1 b	99.4±0.2 a	97.0±2.3 ab	97.9±1.6 ab	99.2±1.2 a
7 月 29 日 Jul. 29	69.7±2.3 d	86.3±2.7 c	95.5±4.0 b	95.4±3.0 b	95.0±4.5 b	95.8±0.5 b	99.3±0.1 a
8 月 5 日 Aug. 5	72.9±2.9 e	87.8±1.2 d	99.2±0.2 a	97.6±0.1 b	99.3±1.2 a	99.3±1.2 a	94.2±1.2 c
9 月 5 日 Sept. 5	72.4±3.6 c	90.1±2.3 b	98.2±1.2 a	99.3±1.0 a	99.3±0.4 a	99.3±0.6 a	98.7±0.4 a
10 月 5 日 Nov. 5	77.5±0.6 c	92.9±0.9 b	99.3±0.4 a	98.6±0.5 a	98.4±1.4 a	99.3±2.3 a	99.3±0.9 a

续,各植物对污水中总氮(TN)的去除率呈先逐步上升,后缓慢下降的趋势,但在整个试验过程中始终高于同期对照。其中,各植物对试验水体中 TN 的去除率至 8 月 5 日(试验第 30 天)达到最大值,此时芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲分别达到 85.7%、90.5%、71.0%、73.2%和 84.1%,分别显著高于污水静置(CK₁)和无植物对照(CK₂) 24.1%~40.4%和 7.9%~27.7%,并以水葱的去除率最高,其次为芦苇和长苞香蒲,而千屈菜和扁秆藨草较低。即各植物均能有效清除污水中的总氮,并以水葱的去除效果最佳。

2.1.4 总磷去除率 试验中各植物对总磷(TP)的去除率变化趋势与铵态氮(NH₄⁺-N)相同,呈现先明显上升后缓慢降低的趋势(表 4)。其中,在 7 月 29 日(试验第 24 天)各植物所处水体中 TP 的浓度由 1.46 mg·L⁻¹降至 0.03~0.09 mg·L⁻¹,均达到地表水Ⅱ类水标准(GB 3838-2002)。就污水中 TP 的去除速度来看,各植物表现不一。在试验第 6 天,芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲对水体中 TP 的去除率分别为 66.9%、68.7%、62.8%、57.1%和 75.8%,以长苞香蒲的去除率最高,芦苇、水葱和千屈菜次之,而扁秆藨草最低。试验各植物对污水中 TP 的去除率均高于污水静置(CK₁)和无植物对照(CK₂),且差异达极显著水平($P<0.01$)。

以上结果说明各植物均能有效去除污水中总磷,并以长苞香蒲的去除效果最好。

2.1.5 pH 的变化 从表 5 可看出,试验中各植物所处污水 pH 值总体呈先迅速下降,后缓慢波动上升趋势,且始终显著低于同期污水静置(CK₁)和无植物对照(CK₂)。其中,5 种湿地植物所处污水的 pH 值在 7 月 11 日由 9.57 降至 8.00~8.26,之后随时间变化呈现波动性逐步上升趋势。就 5 种湿地植物处理水体 pH 的变化来看,均呈现弱碱性,在 8.42~8.75 之间变化,且植物间差异不显著。以上结果说明,各湿地植物对污水 pH 均具有良好的调节作用。

2.2 各植物对定植土壤总磷和总氮含量的影响
从表 6 可看出,试验期间土壤总磷含量随时间变化呈先升高后降低的趋势;各植物定植土壤中总磷含量均低于无植物对照(CK₂),且差异达到显著水平。其中,长苞香蒲和芦苇定植土壤总磷含量呈现双峰曲线变化,第一峰值出现在 7 月 17 日,第二峰值出现在 7 月 29 日;水葱、千屈菜和扁秆藨草定植土壤总磷含量随时间变化趋势与对照(CK₂)均为相似的单峰曲线,但峰值出现的时间各异。

同时,各植物定植土壤中总氮含量随时间延续呈先升高后降低的趋势,与各植物定植土壤总磷含量变化类似(表 7);各种植物定植土壤总氮含量均

表 3 5 种湿地植物对污水中总氮的去除率

Table 3 Removal rate of total nitrogen(TN) in the sewage by five wetland plants/%

日期 Date	CK ₁	CK ₂	芦苇 <i>P. australis</i>	水葱 <i>S. validus</i>	千屈菜 <i>L. salicaria</i>	扁秆藨草 <i>S. planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>T. angustata</i>
7 月 11 日 Jul. 11	19.1±1.4 d	26.0±3.1 c	53.2±1.5 a	54.6±2.0 a	40.5±3.7 b	35.0±2.8 c	48.1±4.4 ab
7 月 17 日 Jul. 17	31.6±3.0 g	39.7±2.5 f	61.3±2.9 b	66.8±2.8 a	46.2±2.8 e	49.1±3.0 de	55.9±0.9 c
7 月 23 日 Jul. 23	30.9±3.4 d	49.7±5.7 c	67.7±2.3 a	69.6±2.1 a	59.1±2.0 b	62.3±1.7 b	63.0±1.5 b
7 月 29 日 Jul. 29	43.7±2.9 c	57.2±4.2 c	72.1±2.5 a	78.9±6.3 a	66.1±2.6 b	65.1±3.3 b	73.0±1.6 a
8 月 5 日 Aug. 5	53.9±2.4 e	65.4±1.8 d	85.7±4.1 b	90.5±3.5 a	71.0±3.6 c	73.2±1.9 c	84.1±3.0 b
9 月 5 日 Sept. 5	54.2±4.0 e	65.7±1.6 d	84.1±1.8 b	86.4±2.7 a	77.6±3.4 c	80.8±1.5 b	82.4±1.8 b
10 月 5 日 Nov. 5	52.5±2.6 e	64.3±1.9 d	77.0±4.4 b	83.8±3.4 a	68.8±1.5 c	78.3±2.6 ab	76.1±2.9 b

表 4 5 种湿地植物对污水中总磷的去除率

Table 4 Removal rate of total phosphorus (TP) in the sewage by five wetlands plants/%

日期 Date	CK ₁	CK ₂	芦苇 <i>P. australis</i>	水葱 <i>S. validus</i>	千屈菜 <i>L. salicaria</i>	扁秆藨草 <i>S. planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>T. angustata</i>
7 月 11 日 Jul. 11	33.8±3.0 f	42.6±3.3 e	66.9±0.4 b	68.7±2.9 b	62.8±2.9 c	57.1±2.8 d	75.8±2.0 a
7 月 17 日 Jul. 17	61.6±4.3 d	74.4±4.6 c	91.6±1.0 a	87.7±3.1 a	81.3±4.0 b	87.6±3.0 a	89.0±1.8 a
7 月 23 日 Jul. 23	61.6±5.4 e	77.2±5.0 d	96.3±2.4 a	87.0±4.1b	85.4±3.2b	90.9±3.7 ab	81.7±4.2c
7 月 29 日 Jul. 29	66.4±5.0 c	78.5±3.1b	97.3±1.2 a	93.6±5.7 a	96.6±0.6 a	93.6±3.4 a	97.9±1.2 a
8 月 5 日 Aug. 5	69.4±1.4 d	79.7±2.2 c	97.1±0.5 a	95.0±1.1 b	97.6±0.3 a	95.4±1.0 b	98.4±0.8 a
9 月 5 日 Sept. 5	77.9±2.6 d	83.3±2.2 c	97.5±0.6 a	96.7±1.7 ab	97.4±1.3 a	95.5±0.4 b	98.3±0.3 a
10 月 5 日 Nov. 5	76.0±4.0 d	81.1±0.8 c	97.3±0.3 a	97.9±0.4 a	89.7±0.5 b	97.3±0.4 a	97.3±0.2 a

低于无植物对照,且其间差异明显大于土壤总磷。其中,自7月17日后长苞香蒲、芦苇和水葱3种植物定植土壤中总氮含量的降幅显著大于千屈菜和扁秆藎草;自7月11日到10月5日,芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藎草和长苞香蒲定植土壤中总氮含量分别下降了27.9%、22.1%、9.9%、12.6%和17.8%,其中以芦苇降幅最大,其次为水葱,长苞香蒲、扁秆藎草和千屈菜较低,且植物间差异显著。以上结果说明,随处理时间的延续,污水中的总氮逐步被土壤吸收,致使土壤总氮含量上升,后由于植物的吸收作用土壤总氮含量逐步下降,且芦苇对总氮的吸收能力最强。

2.3 各植物氮磷累积能力及其氮磷累积量比较

从图1可看出,5种湿地植物对氮累积能力远

高于对磷累积能力,芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藎草和长苞香蒲的氮累积能力分别是磷累积能力的7.1、5.9、5.0、4.6和1.6倍;植物之间相比较而言,它们对氮素的累积能力表现为芦苇>水葱>千屈菜>扁秆藎草>长苞香蒲,且相互之间差异显著。芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藎草和长苞香蒲的磷累积能力分别为1.06、0.76、0.68、1.09和1.45 mg·g⁻¹,且长苞香蒲、芦苇和扁秆藎草磷累积能力显著高于千屈菜和水葱。

同时,不同植物因其生物量和氮磷的累积能力不同,造成其植株氮磷累积量的差异(表8)。其中,芦苇对氮磷的累积量最大,其次为长苞香蒲、水葱、千屈菜和扁秆藎草,且其间差异显著;各湿地植物总磷的累积量大于所添加的总磷含量,其中的芦苇和

表5 试验期间各处理污水 pH 随时间的变化

Table 5 Variation of domestic sewage pH of different treatments during the trial period

日期 Date	CK ₁	CK ₂	芦苇 <i>P. australis</i>	水葱 <i>S. validus</i>	千屈菜 <i>L. salicaria</i>	扁秆藎草 <i>S. planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>T. angustata</i>
7月11日 Jul. 11	9.2±0.1 b	9.5±0.1 a	8.1±0.1 d	8.1±0.1 d	8.0±0.1 d	8.3±0.0 c	8.2±0.1 cd
7月17日 Jul. 17	9.6±0.1 a	9.0±0.2 b	8.2±0.1 cd	8.1±0.1 cd	8.0±0.1 d	8.1±0.1 cd	8.3±0.1 c
7月23日 Jul. 23	9.1±0.1 a	8.8±0.2 a	8.0±0.1 b	8.1±0.1 b	7.9±0.1 b	8.0±0.0 b	8.0±0.2 b
7月29日 Jul. 29	8.9±0.2 a	9.2±0.1 a	8.3±0.0 c	8.3±0.0 c	8.2±0.1 c	8.3±0.0 c	8.5±0.1 b
8月5日 Aug. 5	9.0±0.2 a	9.1±0.2 a	8.2±0.1 b	8.3±0.1 b	8.1±0.2 b	8.2±0.0 b	8.4±0.2 b
9月5日 Sept. 5	9.4±0.0 a	9.1±0.2 b	8.7±0.1 c	8.6±0.0 c	8.4±0.1 d	8.7±0.0 c	8.5±0.2 cd
10月5日 Nov. 5	9.1±0.1 a	9.3±0.1 a	8.3±0.1 b	8.4±0.1 b	8.4±0.0 b	8.3±0.2 b	8.4±0.3 b

表6 试验期间土壤中总磷含量随时间的变化

Table 6 Variation of total phosphorus content in soil during the trial period/(mg·g⁻¹)

日期 Date	CK ₂	芦苇 <i>P. australis</i>	水葱 <i>S. validus</i>	千屈菜 <i>L. salicaria</i>	扁秆藎草 <i>S. planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>T. angustata</i>
7月11日 Jul. 11	0.67±0.01 a	0.65±0.01 ab	0.62±0.01 bc	0.64±0.01 b	0.65±0.01 ab	0.60±0.01 c
7月17日 Jul. 17	0.69±0.02 a	0.66±0.02 ab	0.63±0.02 c	0.66±0.01 b	0.67±0.01 ab	0.61±0.01 c
7月23日 Jul. 23	0.69±0.01 a	0.58±0.01 d	0.62±0.01 c	0.65±0.01 b	0.68±0.01 a	0.56±0.02 d
7月29日 Jul. 29	0.69±0.02 a	0.62±0.01 c	0.63±0.01 bc	0.63±0.02 bc	0.65±0.01 b	0.63±0.01 bc
8月5日 Aug. 5	0.67±0.01 a	0.59±0.01 c	0.56±0.01 d	0.62±0.01 b	0.62±0.02 bc	0.57±0.01 d
9月5日 Sept. 5	0.63±0.01 a	0.57±0.01c	0.59±0.02 bc	0.59±0.01 b	0.62±0.01 a	0.57±0.01c
10月5日 Nov. 5	0.62±0.01 a	0.55±0.02 b	0.57±0.02 b	0.60±0.02 a	0.60±0.01 a	0.57±0.04 b

表7 试验期间土壤中总氮含量随时间的变化

Table 7 Variation of total nitrogen content in soil during the trial period/(mg·g⁻¹)

日期 Date	CK ₂	芦苇 <i>P. australis</i>	水葱 <i>S. validus</i>	千屈菜 <i>L. salicaria</i>	扁秆藎草 <i>S. planiculmis</i>	长苞香蒲 <i>T. angustata</i>
7月11日 Jul. 11	0.61±0.02 a	0.58±0.01 b	0.55±0.02 c	0.52±0.01 d	0.56±0.02 bc	0.53±0.01 d
7月17日 Jul. 17	0.63±0.02 a	0.53±0.01 d	0.53±0.02 dc	0.58±0.01 b	0.59±0.01 b	0.55±0.01 c
7月23日 Jul. 23	0.65±0.01 a	0.55±0.01 c	0.51±0.01 d	0.57±0.01 bc	0.59±0.01 b	0.50±0.01 d
7月29日 Jul. 29	0.67±0.03 a	0.49±0.01 d	0.51±0.02 c d	0.53±0.02 c	0.59±0.03 b	0.50±0.01 cd
8月5日 Aug. 5	0.61±0.01 a	0.39±0.02 e	0.44±0.01 d	0.47±0.01 c	0.52±0.02 b	0.44±0.01 d
9月5日 Sept. 5	0.56±0.01 a	0.42±0.01d	0.43±0.01 d	0.46±0.01 c	0.50±0.03 b	0.44±0.01 cd
10月5日 Nov. 5	0.54±0.01 a	0.42±0.01 c	0.43±0.01 c	0.47±0.01 b	0.49±0.02 b	0.43±0.04 c

长苞香蒲显著高于其他 3 种植物;各湿地植物总氮累积量除芦苇和长苞香蒲外,其他 3 种植物均小于所添加的总氮量。

另外,就污水中总磷的分布来说,芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲分别吸收了 97.3%、97.9%、89.7%、97.3%和 97.3%,污水中分别剩余 2.7%、2.1%、10.3%、2.7%和 2.7%,土壤滞留为零。污水中总氮在植物体、污水和土壤中分布因植物种类不同有很大差别,芦苇、水葱、千屈菜、扁秆藨草和长苞香蒲分别吸收了 77.0%、83.4%、45.0%、46.8%和 76.1%,污水中分别剩余 23.0%、16.2%、31.2%、21.7%和 23.9%,土壤中分别滞留 0%、0.4%、23.8%、31.6%和 0%。以上结果说明,植物的存在对污水中总磷、总氮的去除发挥了重要作用,植物吸收了污水中大部分的磷元素和氮元素,且以芦苇吸收量最高,其次为水葱和长苞香蒲,扁秆藨草和千屈菜较低。

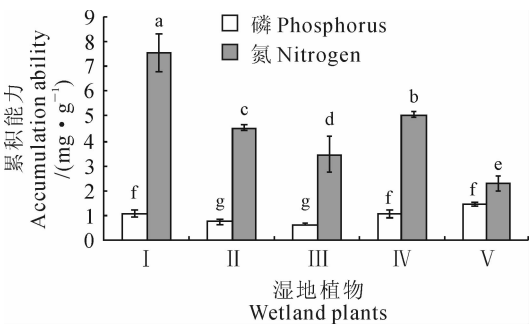


图 1 5 种湿地植物的氮磷累积能力
I. 芦苇; II. 水葱; III. 千屈菜; IV. 扁秆藨草; V. 长苞香蒲
Fig. 1 Accumulation ability of nitrogen and phosphorus in five wetland plants
I. *P. australis*; II. *S. validus*; III. *L. salicaria*;
IV. *S. planiculmis*; V. *T. angustata*

2.4 各种湿地植物对污水净化能力综合评价

将 5 种湿地植物对污水中 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN、TP 的去除率,以及氮磷在植物体内的累积能力作为因子,对植物净化污水的能力进行主成分分析。结果(表 9)显示,主成分 F₁、F₂ 和 F₃ 累计贡献率为 98.189%,即这 3 主成分能够解释大部分数据信息,可以选择这 3 个主成分进行提取分析。表 9 中 COD_{Cr}、TN、TP 平均去除率和氮累积能力在第 1 主成分上有较高载荷,说明第 1 主成分基本反映了这些指标的信息;NH₄⁺-N 平均去除率和磷累积能力分别在第 2 和第 3 主成分上有较高载荷,说明第 2 和第 3 主成分分别反映了 NH₄⁺-N 平均去除率和磷累积能力。

将主成分初始因子载荷除以其主成分初始特征值的平方根,可得到主成分特征向量,将得到的特征向量与标准化后的数据相乘,可写出各主成分表达式(式中 ZX₁~ZX₆ 为标准化后的数据):

$$F_1 = 0.545ZX_1 + 0.386ZX_2 + 0.550ZX_3 - 0.216ZX_4 + 0.429ZX_5 + 0.145ZX_6$$
$$F_2 = 0.167ZX_1 + 0.471ZX_2 + 0.035ZX_3 + 0.688ZX_4 - 0.434ZX_5 + 0.295ZX_6$$
$$F_3 = -0.019ZX_1 - 0.384ZX_2 + 0.131ZX_3 - 0.238ZX_4 - 0.209ZX_5 + 0.857ZX_6$$

以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总特征值之和的比例为权重计算主成分综合模型:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} F_1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} F_2 + \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} F_3$$

即可得到主成分综合模型:

$$F_{\text{综合}} = 0.338ZX_1 + 0.272ZX_2 + 0.331ZX_3 + 0.034ZX_4 + 0.073ZX_5 + 0.314ZX_6$$

根据主成分表达式和主成分综合模型计算各主成分值和主成分综合值,并对其进行排序,即可对各

表 8 污染物总磷总氮在植物、水体和土壤中的分布

Table 8 Removal contribution to TN and TP in wetland plants,sewage and soil

植物 Plant	植物净累积量 Net cumulative by plants/mg		污水剩余量 Surplus in sewage/mg		土壤滞留量 Surplus in soil/mg	
	TP	TN	TP	TN	TP	TN
芦苇 <i>P. australis</i>	209.6±12.0 a	1 362.5±93.2 a	0.40±0.01 b	79.3±3.2 b	—	—
水葱 <i>S. validus</i>	51.4±2.2 b	287.7±15.7 b	0.31±0.02 c	56.0±5.6 c	—	1.3±0.1 c
千屈菜 <i>L. salicaria</i>	47.6±8.6 b	155.1±24.6 c	1.50±0.05 a	107.8±13.5 a	—	82.1±10.9 b
扁秆藨草 <i>S. planiculmis</i>	47.7±1.9 b	161.3±4.5 c	0.40±0.02 b	74.8±9.7 b	—	108.9±15.3 a
长苞香蒲 <i>T. angustata</i>	197.5±6.7 a	275.8±38.1 b	0.40±0.03 b	82.4±8.6 b	—	—

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$);—表示无滞留量。
Note:The different normal letters within the same column indicate significant difference among plants at 0.05 level;— stand for non-contribution.

表 10 各植物主成分得分及综合得分排序
Table 10 Score of Prin 1, Prin 2, Prin 3 and synthetic assessment

植物名称 Wetland plant	F ₁		F ₂		F ₃		F _{综合}	
	得分 Score	排序 Grade	得分 Score	排序 Grade	得分 Score	排序 Grade	得分 Score	排序 Grade
芦苇 <i>P. australis</i>	2.819	1	-0.951	4	0.128	3	1.280	1
水葱 <i>S. validus</i>	0.272	2	1.243	2	-1.486	5	0.230	3
千屈菜 <i>L. salicaria</i>	-1.986	5	-1.044	5	-0.398	4	-1.438	5
扁秆藨草 <i>S. planiculmis</i>	-0.843	4	-0.804	3	0.499	2	-0.592	4
长苞香蒲 <i>T. angustata</i>	-0.263	3	1.557	1	1.256	1	0.519	2

表 9 主成分分析矩阵、主成分初始特征值、
累积率和累积贡献率

Table 9 Eigen values of the correlation matrix and
eigenvectors of principal component analysis

指标 Characteristic	主成分 Principal component		
	F ₁	F ₂	F ₃
CODcr 平均去除率 X ₁ Average removal rate of CODcr X ₁	0.972	0.215	-0.019
总氮平均去除率 X ₂ Average removal rate of total nitrogen X ₂	0.690	0.606	-0.394
总磷平均去除率 X ₃ Average removal rate of total phosphorus X ₃	0.981	0.046	0.134
氨氮平均去除率 X ₄ Average removal rate of ammonium nitrogen X ₄	-0.386	0.885	-0.244
氮累积能力 X ₅ Accumulation ability of nitrogen X ₅	0.766	-0.558	-0.214
磷累积能力 X ₆ Accumulation ability of phosphorus X ₆	0.259	0.379	0.880
主成分初始特征值 λ Initial eigen values λ	3.186	1.653	1.053
主成分贡献率 Contribution rate of factor/%	53.094	27.552	17.543
主成分累积贡献率 Cumulative contribution rate of factor/%	53.094	80.646	98.189

植物的污水净化能力进行综合评价比较,结果如表 10 所示。其中,芦苇对污水的综合净化能力最强,其次为长苞香蒲、水葱和扁秆藨草,千屈菜最低。

3 讨论与结论

本研究结果表明,与污水静置(CK₁)和无植物(CK₂)对照相比较,5 种湿地植物对生活污水中 CODcr、铵态氮、总氮和总磷均具有良好的去除效果,证明湿地植物的存在对污水净化具有重要作用,该研究结果与以往大量研究结果一致^[20]。王世和^[21]和梁威^[22]等研究表明,污水中 CODcr 的去除主要靠植物的吸收和微生物的代谢作用,且与氧的关系非常密切。本试验中 5 种不同湿地植物对

CODcr 的净化效果存在一定差异,其中芦苇、水葱和长苞香蒲对 CODcr 的平均去除率显著高于千屈菜和扁秆藨草。其原因与芦苇、水葱和长苞香蒲的通气组织发达有关,可将大量氧气输送至其根部,使根部微生物数量增加,从而提高对污水中有机物的去除能力^[23]。短期(7 月)内植物对污水 CODcr 去除效果不佳,直至 8 月 5 日污水中 CODcr 的去除率达到最大值。谢飞等^[24]研究发现,随着气温的升高,人工湿地对氨氮、总氮和 CODcr 的去除率呈现逐渐增加趋势。7 月底和 8 月初正是宁夏气温最高时期,说明此期间微生物大量繁殖,对污染的分解速率高,致使在 8 月 5 日达到了最大去除率。就长期(7~10 月)来看,各植物对污水 CODcr 的去除率维持在较高水平(80.7%~95.8%之间),这说明污水中有机污染的去除需要一个长期的过程,有机污染物相互作用沉降以及被土壤吸附,同时微生物大量繁殖分解有机污染物,分解后的营养元素可被植物吸收,从而达到污染物去除的目的。

人工湿地对氮的去除主要依靠植物的直接吸收和微生物的氨化、硝化、反硝化等作用完成^[25]。本实验中,短期(7 月)内污水中氨氮的去除达到较好效果,5 种湿地植物在 7 月 29 日对生活污水中氨氮的去除率在 95.0%~99.3%之间;植物对污水中总氮的去除短期(7 月)内呈现逐渐上升趋势,至 8 月 5 日去除率达到最大值。长期来看,自 7 月 5 日开始至 10 月 5 日去除率基本维持在 68.8%~90.5%之间。试验第 12 天植物对氨氮和总氮的去除率分别在 80%和 46%以上,可见,湿地植物对氨氮的去除速率明显大于总氮。这与方焰星等^[19]的研究结果一致,与植物能直接吸收污水中的氨氮有关。

人工湿地除磷主要依赖湿地基质、水生植物和微生物三者之间的联合作用,通过一系列复杂的物理、化学以及生物途径实现磷素去除的目的^[26]。本试验中各植物对污水中总磷的去除效果明显,短期(7 月)内已经达到较好效果,如 7 月 29 日 5 种湿地

植物对生活污水中总磷的去除率在 93.6%~97.9%之间,污水静置(CK₁)和无植物(CK₂)对磷的去除在 7 月 17 日已达到 60%以上。Vincent 等^[27]研究发现芦苇和香蒲对污水中总磷的去除率可达到 94%~99%,本实验的研究结果与之一致。杜刚^[28]等利用芦竹(*Arundo donax*)和菖蒲(*Acorus calamus*)构建人工湿地处理微污染河水,发现总磷的去除率仅为 38.9%~48.6%,远低于本实验中总磷的去除率,这可能是因所选湿地植物的种属不同而造成的差异。有研究表明^[29-30],在碱性条件下,磷吸附于含大量钙离子的碱性基质中,可形成几乎不溶的磷酸钙沉淀。试验中各水体均呈碱性,说明污水自身的沉降和基质对磷的吸附是污水中磷去除的主要途径,但植物的作用不可忽视,磷是植物生长必需的元素,污水中的无机磷可被植物吸收和同化合成 ATP 等,可通过收割植物而被带出系统^[31-32]。本试验后期收割植物测定总磷含量发现各植物体内累积总磷含量占总磷去除量的 50.3%~82.6%。

本研究中扁秆藎草的总氮和总磷累积能力高于水葱和千屈菜,而其对污水中总氮和总磷的去除率却较低,这可能是因为扁秆藎草的生物量小于水葱和千屈菜,导致其氮磷累积量比较低。短期(7 月)内,各植物定植土壤中氮磷含量呈现上升趋势,并于 7 月 29 日达到最大值,说明短期(7 月)污水中总磷和总氮去除率的迅速上升,主要是由于植物直接吸收和土壤吸附共同作用的结果。从长期(7~10 月)富集效果来看,土壤中总磷和总氮含量呈现下降趋势,由于后期植物生长代谢缓慢和植物吸收氮磷能力降低,故后期氮磷元素的下降主要是土壤微生物分解的作用。本试验中各植物对磷的净累积量均大于污水中总磷的含量,因为植物在生长过程中对氮磷元素的吸收不具有选择性,由于生长代谢的需要,植物还吸收了原土壤中的磷元素。氮元素在植物体、污水和土壤中的分布随着植物的种类不同而差异很大。芦苇和长苞香蒲氮元素的净累积量大于所添加污水中总氮的量,说明芦苇和长苞香蒲除吸收了污水氮磷元素外,还吸收土壤中原有的氮磷元素;而对于水葱、千屈菜和扁秆藎草来说情况不同,污水

中剩余和土壤中滞留的总量大于植物对污水中总磷总氮的吸收量。

由于 5 种湿地植物对污水中 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的去除率以及氮磷累积能力方面相互存在差异性,故将 5 种湿地植物的平均 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN 和 TP 去除率,以及氮磷累积能力作为因子,对植物净化污水的能力进行主成分分析,综合评价 5 种植物对污水的净化能力。结果显示 5 种湿地植物综合净化能力从强到弱的顺序依次为芦苇>长苞香蒲>水葱>扁秆藎草>千屈菜。由于各植物对污水中污染物去除率的差异,可以根据所处理污水中污染物含量的不同选择不同的植物构建人工湿地,或者可以选择几种植物搭配,构建复合人工湿地,从而增加污水处理效果。由于本实验在 7 月初到 10 月初进行,正是湿地植物生长旺盛季节,相应其净化能力也高,所以本实验所测得的污水中各污染指标的去除率相对较高。因一旦建立人工湿地用于净化污水,需要全年运行,故下一步还需要对湿地植物其他月份净化污水能力做相关研究。

综上所述,本试验中模拟人工湿地小试系统能有效地去除生活污水中 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TN 和 TP,且对生活污水中铵态氮和总磷的去除率高于总氮和 COD_{Cr}。湿地植物对污水 NH₄⁺-N 和 TP 的去除率分别在试验第 18 天和 24 天达到较高水平,对污水 COD_{Cr} 和 TN 在实验第 30 天达到较好净化效果。因此,在人工湿地运行中对 NH₄⁺-N 和 TP 含量较高的污水的停留时间可以选择在 24 d 左右,而对 TN 和 COD_{Cr} 含量较高的污水的停留时间可以选择在 30 d 以上。污水中总磷和总氮分布随植物种类的不同有较大差异,芦苇、水葱、长苞香蒲吸收了污水中大部分总磷总氮,而千屈菜和扁秆藎草对污水中总氮的吸收量少于污水中剩余和土壤中滞留的量。5 种湿地植物对各污染指标的去除能力各有不同,对污水中 COD_{Cr} 和 TP 平均去除率最高的植物是芦苇,对污水中 NH₄⁺-N 和 TN 和平均去除率最高的植物是水葱。主成分分析的结果表明,芦苇对生活污水中污染物的综合去除效果最好,其次是长苞香蒲和水葱,扁秆藎草和千屈菜较差。

参考文献:

- [1] JODEH S, SALIM M, HADDAD M, et al. Impacts of biodegradable organics on soils and groundwater in West Bank[J]. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 2013, 14(1): 75-82.
- [2] QIU J, XIAOHOU S, JUNYI T, et al. Economic analysis of the wetland reservoir subirrigation system in Southern China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 12: 206-211.
- [3] CUI F, YUAN B, WANG Y. Constructed wetland as an alternative solution to Maintain Urban Landscape Lake Water Quality: Trial of

- Xing-Qing Lake in Xi'an City[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2 525—2 532.
- [4] HOUSE C, BERGMANN B, STOMP A, *et al.* Combining constructed wetlands and aquatic and soil filters for reclamation and reuse of water[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(1): 27—38.
- [5] BRIX H. Use of constructed wetlands in water pollution control; historical development, present status, and future perspectives[J]. *Water Science and Technology*, 1994, 30(8): 209—224.
- [6] LIU X, HUANG S, TANG T, *et al.* Growth characteristics and nutrient removal capability of plants in subsurface vertical flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 189—198.
- [7] WU ZH B(吴振斌), LIANG W(梁 威), QIU D R(邱东茹), *et al.* The correlation between the substrate enzymatic activities and purification of wastewater in the integrated vertical constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, 22(07): 1 012—1 017(in Chinese).
- [8] ZHAO Y, BABATUNDE A, HU Y, *et al.* Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment[J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46(1): 278—283.
- [9] HIJOSA-VALSERO M, SIDRACH-CARDONA R, BECARES E. Comparison of interannual removal variation of various constructed wetland types[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 430(0): 174—183.
- [10] SCHUETZ T, WEILER M, LANGE J, *et al.* Two-dimensional assessment of solute transport in shallow waters with thermal imaging and heated water[J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 43: 67—75.
- [11] ZHAO J(赵 军), XUE Y(薛 宇), LI X D(李晓东), *et al.* Removal of organic matter and nitrogen from wastewater by integrated vertical flow constructed wetland[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering* (环境工程学报), 2013, 7(1): 26—30(in Chinese).
- [12] XIONG J Q(熊家晴), LIU H Y(刘华印), LIU Y J(刘永军), *et al.* Pilot-scale research on treatment of polluted river water by hybrid constructed wetland[J]. *Technology of Water Treatment* (水处理技术), 2012, (12): 82—89(in Chinese).
- [13] ZHU Q Q(朱倩倩), HE X Y(何先湧), HU ZH L(胡章立), *et al.* Treatment of industrial wastewater with plant composite bed technology[J]. *Environmental Chemistry* (环境化学), 2012, (7): 1 069—1 075(in Chinese).
- [14] GU F F(谷飞飞), HONG J M(洪剑明). Study on the treatment of wastewater from cold water fish breeding by an integrated wetland system[J]. *Journal of Capital Normal University* (Nat. Sci. Ed.) (首都师范大学学报·自然科学版), 2012, 33(5): 37—41(in Chinese).
- [16] ZHANG A P(张爱平), YANG SH Q(杨世琦), *et al.* Analysis on current situation of water pollution and pollutant sources in Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, 18(6): 1 295—1 301(in Chinese).
- [15] CHENG SH P(成水平), WU ZH B(吴振斌), KUANG Q J(况琪军). Macrophytes in artificial wetland[J]. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2002, 14(2): 179—184(in Chinese).
- [17] 王冬梅. 土壤理化分析实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [18] LÜ W X(吕伟仙), GE Y(葛 滢), WU J ZH(吴建之), *et al.* Study on the method for the determination of nitric nitrogen, ammoniacal nitrogen and total nitrogen in plant[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (光谱学与光谱分析), 2004, 24(2): 204—206(in Chinese).
- [19] WANG Q H(王庆海), DUAN L SH(段留生), LI R H(李瑞华), *et al.* Comparison of nutrient uptake from rural domestic sewage of aquatic plants[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2008, 23(2): 217—222(in Chinese).
- [20] CHEN X N(陈小鸟), WANG H ZH(王海珍). Effect of water quality through artificial planted aquatic plant in Dianshan Lake[J]. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2011, 34(5): 30—34(in Chinese).
- [21] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 科学出版社, 2007.
- [22] LIANG W(梁 威), HU H Y(胡洪营). The role of biology during the wastewater purification in constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater* (中国给水排水), 2003, 19(10): 28—31(in Chinese).
- [23] HU ZH Y(胡智勇), LU K H(陆开宏), LIANG J J(梁晶晶). Role of rhizosphere microorganisms of aquatic plants in phytoremediation of wastewater[J]. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2010, 33(5): 75—80(in Chinese).
- [24] XIE F(谢 飞), HUANG L(黄 磊), GAO X(高 旭), *et al.* Purification efficiencies of subsurface horizontal flow constructed wetland treating slightly polluted river water[J]. *Environmental Science & Technology* (环境工程学报), 2013, 7(1): 65—71(in Chinese).
- [25] ZHANG J(张 军), ZHOU Q(周 琪), HE R(何 蓉). Mechanism of nitrogen and phosphorus removal in free-water surface constructed wetland[J]. *Ecology and Environment* (生态环境), 2004, 13(1): 98—101(in Chinese).
- [26] LI X D(李晓东), SUN T H(孙铁珩), LI H B(李海波), *et al.* Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, 27(3): 55—59(in Chinese).
- [27] VINCENT G, FLORENT C, MARGIT K, *et al.* Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland[J]. *Water Research*, 2012, 46(16): 5 305—5 315.
- [28] DU G(杜 刚), HUANG L(黄 磊), GAO X(高 旭), *et al.* Number of microbe and relationship between it and removal of pollutants in constructed wetlands[J]. *Wetland Science* (湿地科学), 2013, 11(1): 13—20(in Chinese).
- [29] STUMM W. Aquatic chemistry; an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters by werner strumm and James J. Morgan [M]. New York, Wiley-Interscience, 1970.
- [30] KAASIK A, VOHLA C, MOTLEP R, *et al.* Hydrated calcareous oil-shale ash as potential filter media for phosphorus removal in constructed wetlands[J]. *Water Research*, 2008, 42(4): 1 315—1 323.
- [31] LU SH Y(卢少勇), JIN X C(金相灿), YU G(余 刚). Phosphorus removal mechanism of constructed wetland[J]. *Ecology and Environment* (生态环境), 2006, 15(2): 391—396(in Chinese).
- [32] YU H B(余红兵), YANG ZH J(杨知建), XIAO R L(肖润林), *et al.* Absorption capacity of nitrogen and phosphorus of aquatic plants and harvest mangnagement research[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2013, 22(1): 294—299(in Chinese).