

4 种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响

徐德福, 李映雪, 方 华, 赵晓莉

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

摘 要:野外调查分析了 4 种常见湿地植物的最长根长, 根系体积, 植物密度, 植株的氮、磷和锌含量等对人工湿地去除污染物、人工湿地设计和人工湿地使用寿命的影响。结果表明, 最长根长以美人蕉为最长(43.73 cm), 芦苇其次(32.50 cm), 黄花鸢尾最短(12.57 cm); 根系体积以美人蕉最大(66.72 cm³), 芦苇其次(17.42 cm³), 黄花鸢尾最低(4.70 cm³); 密度以芦苇最高(257 株·m⁻²), 美人蕉其次(61 株·m⁻²), 茭白最低(54 株·m⁻²); 单位面积上芦苇、美人蕉、茭白和黄花鸢尾地上部分生物量分别是 4.27、2.12、0.94 和 0.78 kg·m⁻²。相应地, 单位面积上植物地上部分对氮、磷和锌的吸收量以芦苇最高, 美人蕉其次, 黄花鸢尾最低。不同植物对人工湿地的使用寿命没有显著影响, 但植物的最长根长和密度可作为人工湿地基质深度设计和植物数量配置的依据。

关键词:湿地植物; 人工湿地设计; 最长根长; 密度; 影响

中图分类号:X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)03-0587-05

Effects of Physiological Character of Four Wetland Plants on Design of the Constructed Wetland Bed

XU De-fu, LI Ying-xue, FANG Hua, ZHAO Xiao-li

(College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Plants play an important role in the constructed wetlands to purify wastewater, which have an important function, such as uptake directly nitrogen(N), phosphorus(P) and heavy metal, enhancing filter coefficient of constructed wetlands, and improvement the microbial activity and the dissolved oxygen content in rhizosphere. In order to research the function of wetland plants in constructed wetland, four wetland plants in the field were collected to investigate physiological character including the maximum root length, the root volume, the plant density, concentration of N, P and zinc. The effects of wetland plants species on lifetime of constructed wetland were also analyzed. Results showed that the root length of *Canna indica* Linn was the longest(43.73 cm), followed by *Phragmites australis* (32.50 cm), and that of *Iris pseudacorus* Linn was the shortest(12.57 cm). The ranking order of the root volume for the four wetland plant: *Canna indica* Linn>*Phragmites australis*>*Zizania cedu Ciflora Turez*>*Iris pseudacorus* Linn. The plant density of four wetland plants species followed the order of *Phragmites australis*>*Canna indica* Linn>*Iris pseudacorus* Linn>*Zizania cedu Ciflora Turez*. The above ground biomass of *Phragmites australis*, *Canna indica* Linn, *Zizania cedu Ciflora Turez* and *Iris pseudacorus* Linn were 4.27, 2.12, 0.94 and 0.78 kg·m⁻², respectively. The content of N, P and zinc accumulated by the above ground plant of four wetland plants could be summarized as followed: *Phragmites australis*>*Canna indica* Linn>*Zizania cedu Ciflora Turez*>*Iris pseudacorus* Linn. The effects of wetland plants species on lifetime of the constructed wetland were not significant difference, but the maximum root length and root volume could be two important parameters to design the constructed wetland.

Keywords: wetland plants; design of constructed wetland; maximum root length; plant density; influence

人工湿地是由植物、微生物、基质和动物等构成的复合生态系统, 由于人工湿地在污水处理中具有低

成本、低运行费用、高效率、管理方便和美观等特点, 已被用来处理城市生活污水、矿山废水和养殖废水等, 其应用前景越来越广泛。植物在人工湿地中具有重要的作用, 如稳定人工湿地床中的基质、减缓人工湿地的堵塞、拦截固体物质、提高人工湿地的水力传导性能、输送氧气到根际以提高根际的氧化还原电位、提供微生物附着界面、增强人工湿地的景观效果,

收稿日期: 2008-06-12

基金项目: 南京信息工程大学校基金(QD49); 江苏省高校自然科学研究指导性计划项目(06KJD210116); 江苏省高校自然科学基金基础研究计划项目(08KJB610006)

作者简介: 徐德福(1975—), 男, 贵州省遵义人, 博士, 副教授, 主要从事污染水体生态修复控制研究。E-mail: defuxu1@163.com

并能起到人工湿地的冬季保温等^[1-3]。因此,植物在提高人工湿地对污水的净化能力,确保人工湿地的稳定运行都有着重要的作用。目前,对植物在人工湿地中的净化机理研究比较多,但有关植物对人工湿地设计,如人工湿地基质的设计深度,人工湿地中植物数量配置以及植物对人工湿地使用寿命的影响等问题,尚没有相关的研究报道。因此,研究植物在人工湿地系统中的生长特点对人工湿地去除污染物能力的影响进而指导人工湿地生态工程的设计具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 湿地植物的野外调查和采集

湿地植物的生长周期一般是3月至11月,在该生长阶段内植物不断吸收养分以维持其生长和繁殖,当生长阶段结束后,植物开始枯萎直至死亡,这时其吸收的一部分养分(如氮、磷等)又从植物残体中释放出来。因此,当湿地植物用于污水的人工湿地处理时,植物死亡后应收割,以防止其吸收的氮、磷等释放,而收割植物比较好的季节是11月份。故于11月,在南京市市郊,调查了4种常见湿地植物,美人蕉(*Canna indica* Linn)、芦苇(*Phragmites australis*)、茭白(*Zizania ceduCiflora* Turez)和黄色鸢尾(*Iris pseudacorus* Linn)的株高、密度、生物量和氮、磷和重金属含量。采样方法如下:首先以取样株为中心,在70 cm×70 cm的面积内挖取土壤剖面,挖取深度为未见根系为止,然后将带有植物的土壤剖面放入水中清洗,直至未见根上有泥土为止,并将冲洗下来的土壤用0.25 mm筛子过筛以选出清洗植株时,少部分断离的根系,将清洗干净后的根装入封口袋中带回室内分析,每种植物选择3个长势比较好的植物样块。植物地上部分和地下部分在60℃条件下烘干至恒重并测定其地上部分生物量及其氮、磷和锌含量。

1.2 分析方法

植物最长根长和株高分别采用直尺和皮尺测定;根系体积用排水法间接测定(即把所有洗净的整株植物根系,用吸水纸吸干其表面水分,然后放入装满水且具有溢流管的容器中,测定溢出水的体积即为根系体积);植物密度测定方法为选取面积为1 m²且长势均匀样块,计算单位面积上植物的株数即为植物的密度。植株中的水分采用烘干法测定;植株中的氮和磷用浓H₂SO₄和H₂O₂消煮,比色法测定;植株中锌的含量采用HNO₃湿灰化-原子吸收测定法^[4]。

2 结果与分析

2.1 4种湿地植物最长根长、体积和株高的比较

4种湿地植物的最长根长、根体积和株高见表1。从表中可以看出,不同植物的最长根长存在显著差异,以美人蕉的最长根长最长(43.73 cm),芦苇其次(32.50 cm),黄花鸢尾最短(12.57 cm),美人蕉的最长根长是黄花鸢尾的3.5倍。同样植物根系的体积也存在显著差异,以美人蕉最大(66.72 cm³),芦苇其次(17.42 cm³),而黄花鸢尾最小(4.70 cm³),美人蕉根体积是黄花鸢尾的14.2倍。4种湿地植物中茭白和芦苇的株高比较高,分别是2.14 m和1.93 m,美人蕉其次,而黄花鸢尾则比较低(0.95 m)。

表1 湿地植物的最长根长、体积和株高
Table 1 The maximum root length, plant volume and height of wetland plants

植物	最长根长/cm	根体积/cm ³	株高/m
美人蕉	43.73±4.43 a	66.72±4.82 a	1.62±0.07 b
芦苇	32.50±8.71 b	17.42±3.00 b	1.93±0.39 ab
茭白	23.50±7.07 c	15.65±1.81 b	2.14±0.32 a
黄花鸢尾	12.57±0.8 d	4.70±0.83 c	0.95±0.05 c

注:同一列数据后字母不同表示差异达到显著水平(P<0.05),下同。

2.2 湿地植物密度和地上部分生物量

从表2可知,4种湿地植物的密度存在较大的差异,其中以芦苇的密度最高(257株·m⁻²),且显著高于其他3种植物,其密度分别是美人蕉、黄花鸢尾和茭白的4.2倍、4.4倍和4.8倍,而美人蕉、茭白和黄花鸢尾的密度差异不显著。基于人工湿地中只收割植物的地上部分,因此,本文只测定了湿地植物的地上部分生物量,从表2可以看出,单株植物地上部分生物量也存在差异,以美人蕉最高(34.77 g·株⁻¹),黄花鸢尾最低(13.51 g·株⁻¹),美人蕉地上部分生物量是黄花鸢

表2 湿地植物的密度、单株植物地上部分生物量
和单位面积上地上部分生物量(烘干重)

Table 2 Plant density, the above ground biomass per plant and per area(DW)

植物	密度/株·m ⁻²	植物地上部生物量/g·株 ⁻¹	单位面积植物地上部分生物量/kg·m ⁻²
美人蕉	61±5.0 b	34.77±2.64 a	2.12
芦苇	257±35 a	16.64±1.28 b	4.27
茭白	54±6.0 b	17.32±1.20 b	0.94
黄花鸢尾	58±4.0 b	13.51±1.69 c	0.78

尾的 2.6 倍。根据公式:单位面积上植物地上部分生物量=单株植物地上部分生物量 $\times$ 植物的密度,计算出单位面积上 4 种湿地植物地上部分生物量(见表 2)。芦苇、美人蕉、茭白和黄花鸂尾地上部分生物量分别为 4.27、2.12、0.94 和 0.78 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 4 种湿地植物单位面积上地上部分生物量以芦苇最高,分别是美人蕉、茭白和黄花鸂尾的 2.0、4.5 和 5.5 倍。

2.3 湿地植物对氮和磷的吸收量

4 种湿地植物地上部分氮和磷的含量如表 3 所示。从表 3 中可见芦苇地上部分氮含量最高(31.25 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),茭白次之(28.29 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),黄花鸂尾则比较低(23.51 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$);4 种湿地植物的地上部分磷含量也不同,以茭白和美人蕉的地上部分磷含量比较高,分别是 5.18 和 5.09 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而黄花鸂尾和芦苇的地上部分磷含量相对较低,分别是 4.38 和 4.25 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。单位面积植物地上部分对氮、磷的吸收量=植物地上部分氮、磷含量 $\times$ 单位面积植物的生物量,根据该公式计算 4 种湿地植物对氮、磷的吸收量(见表 3),单位面积上 4 种湿地植物对氮的吸收量以芦苇最高(133.44 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$),美人蕉其次(50.31 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$),黄花鸂尾最低(18.34 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$),芦苇对氮的吸收量分别是美人蕉、茭白和鸂尾的 2.7、5.0 和 7.3 倍。同样地,单位面积上 4 种湿地植物对磷的吸收量以芦苇最高(18.15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$),美人蕉其次(10.79 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$),黄花鸂尾最低(3.42 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$),芦苇对磷的吸收量分别是美人蕉、茭白和黄花鸂尾的 1.7、3.7 和 5.3 倍。

表 3 植物地上部分氮、磷含量和单位面积上植物对氮、磷的吸收量

Table 3 Concentration of N and P in the above ground plant, and quantity of N and P accumulated by wetland plants in per area

植物	地上部氮含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	地上部磷含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	植物对氮的吸收量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	植物对磷的吸收量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
美人蕉	23.73 $\pm$ 2.15 c	5.09 $\pm$ 0.45 a	50.31	10.79
芦苇	31.25 $\pm$ 3.91 a	4.25 $\pm$ 0.41 b	133.44	18.15
茭白	28.29 $\pm$ 2.74 b	5.18 $\pm$ 0.59 a	26.59	4.87
黄花鸂尾	23.51 $\pm$ 2.99 c	4.38 $\pm$ 0.54 b	18.34	3.42

2.4 湿地植物对锌的吸收积累量

4 种湿地植物地上部分与地下部分锌含量如表 4 所示。茭白地上部分锌含量最高,芦苇其次,黄花鸂尾锌含量最低;4 种湿地植物地下部分锌含量以美人蕉最高,茭白其次,芦苇较低。湿地植物锌含量主要分布在根中。茭白和美人蕉地上部分锌的积累量高于美人蕉和黄花鸂尾,说明锌在前两种植物中向地上部分的迁移量高于后两种植物。单位面积上植物地上部分对锌的吸收量=植物地上部分锌含量 $\times$ 单位面积植物的生物量,根据该公式计算 4 种湿地植物对锌的吸收量见表 4。从表 4 可以看出,单位面积上芦苇地上部分对锌的吸收量最高(112.09 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$),美人蕉其次(48.53 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$),黄花鸂尾最低(9.66 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$),芦苇对锌的吸收量分别是美人蕉、茭白和鸂尾的 2.3、3.4 和 11.6 倍。

3 讨论

3.1 植物最长根长对人工湿地床设计深度的影响

人工湿地中的氧气来源主要有两个途径,一个是大气复氧,另一途径为植物光合作用复氧。在这两条途径中,植物光合作用是一个重要的途径。湿地植物通过中空组织输送氧气至根系,并通过根系释放氧气到根际^[5],使根际形成氧化环境,有利于提高好氧微生物的活性,从而提高有机物和氮等的去除。植物的最长根长越长,将能为更深层次的基质提供氧气,因此,可将植物的最长根长作为人工湿地基质的设计深度。从表 1 可以看出 4 种湿地植物的最长根长不同,当分别选用这 4 种植物作为人工湿地植物时,其人工湿地基质的设计深度也应不同。如选用美人蕉作为人工湿地植物时,基质层的设计深度可深些,可达到 43 cm;选用芦苇时,基质层的厚度也可达到 32 cm,而选用黄花鸂尾作为人工湿地基质时,其基质的设计深度应浅,约在 13 cm 左右。因此,植物的最长根长可作为人工湿地基质深度设计的依据。

3.2 植物根系体积在工程中的应用

植物根系影响人工湿地的净化能力,其原因是发

表 4 植物地上部分与地下部分锌含量及单位面积上植物锌的吸收量

Table 4 Concentration of zinc in the above and down ground plant, and quantity of zinc accumulated by wetland plants in per area

植物	地上部锌含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地下部锌含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	地上部锌与地下部锌的比值	地上部分对锌的吸收量/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$
美人蕉	22.89 $\pm$ 1.59 c	79.81 $\pm$ 5.09 a	0.29	48.53
芦苇	26.25 $\pm$ 2.41 b	50.25 $\pm$ 4.91 b	0.52	112.09
茭白	35.47 $\pm$ 4.64 a	60.12 $\pm$ 3.84 c	0.59	33.34
黄花鸂尾	12.39 $\pm$ 2.94 d	55.57 $\pm$ 6.04 d	0.22	9.66

达的植物根系可以分泌较多的根分泌物,分泌物能为微生物生长提供碳源和能源,从而为微生物的生存和生长创造良好的条件,促进根际的生物降解,提高人工湿地净化能力。Anderson 等人的研究表明,植物根际的分泌物可以促进微生物转化,加速污染物的生物降解^[6]。另一方面,植物根系对维持人工湿地系统的稳定性具有重要作用。植物的根系能固定人工湿地床中基质,防止流失,且在保持植物与微生物旺盛生命力等方面发挥着重要作用,这两方面的原因说明植物根系对人工湿地系统的正常运行具有重要作用。成水平等研究指出,长苞香蒲(*Typha angustata*)和水烛等大型水生植物具有粗壮的根系和发达的不定根,而小香蒲(*Typha minima*)的根系发达程度则比较低,结果导致前者的净化能力高于后者^[7]。本研究结果表明,不同植物的根系体积存在显著性差异(表1),以美人蕉根系体积最大(66.72 cm³),芦苇其次(17.42 cm³),黄花鸢尾最小(4.70 cm³)。在这4种植物种,美人蕉具有粗壮肉质根茎,是导致其体积比较大的主要原因,而芦苇、茭白和黄花鸢尾都具有相同的粗壮的匍匐根状茎,因此,这3者的根系在人工湿地中的作用具有可比性。从表1和表3可以看出芦苇、茭白和美人蕉3者根系体积与其对氮和磷的吸收量呈正相关,该结论与 Adcock 等的研究结果相一致,即水麦冬与芦苇相比,具有发达的根系和较高的地下生物量,其对氮、磷的去除效果也比芦苇高^[8]。因此,发达的根系,既能提高人工湿地对污染物的去除能力,也有助于人工湿地生态系统的稳定运行。为此,根系体积可作为人工湿地植物的选择的指标之一。

3.3 植物密度对人工湿地中植物数量配置的影响

植物密度影响了人工湿地的净化能力,人工湿地中植物的数量越多,生物量越大,吸收污染物的数量也越多。4种湿地植物中以芦苇的密度最高,茭白和黄花鸢尾较低;相应的单位面积上以芦苇地上部分的生物量最高,茭白和黄花鸢尾较低(表2),其结果导致单位面积上植物吸收的氮、磷和锌的量以芦苇和美人蕉比较高,茭白和黄花鸢尾较低(表3、表4)。从上可知,植物密度是影响植物吸收污染物的因素,人工湿地中植物密度越低,吸收污染物的数量越低。相反,人工湿地中植物的密度越高,对污染物的吸收量越多,但并不是人工湿地中植物的数量越多越好,因为过高密度的植物容易遭受病虫害。因此,在人工湿地中配置植物数量时应以植物的密度为标准,如在人工湿地中种植芦苇时,其密度可达257株·m⁻²,而

种植美人蕉时,则数量应少些约61株·m⁻²,另外,植物的密度也可以作为人工湿地设计工程师估算建筑成本的依据之一。

3.4 植物对人工湿地使用寿命的影响

人工湿地中的磷循环是影响人工湿地使用寿命的决定性因素。随着人工湿地的运行,大量的磷将在人工湿地中积累,当磷的积累达到人工湿地基质的饱和吸附点时,人工湿地不再去除磷,相反的随着人工湿地的运行,吸附的磷将被释放出来,此时,人工湿地变成了磷的释放源,这意味着人工湿地的使用寿命结束,应该更换基质。因此,人工湿地是具有使用寿命的。人工湿地的使用寿命受很多因素的影响,如温度、磷负荷以及植物根表铁氧化物等都影响了人工湿地的使用寿命。虽然准确的计算人工湿地的使用寿命比较难,但基质对磷的最大吸附量已被用来估算人工湿地的使用寿命^[9-10],这些估算只考虑了基质这一唯一因素,当同时考虑基质和植物对人工湿地使用寿命的影响时,人工湿地的使用寿命可通过下列公式计算:人工湿地的使用时间(d)=基质最大吸附量÷(每日进入人工湿地的磷量-植物每日吸收的磷量)。Drizo 等认为每人每日排泄产生3g PO₄³⁻,另外4g PO₄³⁻来自于生活用水,这样每人每日共产生7g PO₄³⁻(2.3g P);假设处理7g PO₄³⁻需要面积为5m²、深度为0.6m的人工湿地,则共需要3m³的基质^[11]。若使用炉渣作为人工湿地的基质,且能达到炉渣的最大吸附量8.89g·kg⁻¹,则3m³(2.1t)的炉渣能吸附18.67kg P^[7],如果人工湿地中种植芦苇,则3m³的芦苇1a能吸收磷量为54.45mg,每日平均吸收磷为0.149mg(365d计算),根据上述公式计算出种植芦苇的人工湿地使用寿命为8117.920d;如果人工湿地中种植黄花鸢尾,3m³的黄花鸢尾1a能吸收磷为10.26mg,每日吸收磷为0.028mg,按同样的公式计算,种植黄花鸢尾的人工湿地使用寿命为8117.497d。从结果可以看出,种植芦苇和种植黄花鸢尾的人工湿地使用寿命相差不大,只相差了0.423d(约10h)。该结果一方面说明不同植物对人工湿地使用寿命的影响不大,另一方面也说明当进入人工湿地的磷负荷比较大时,通过植物吸收而去除磷对人工湿地中总磷的去除贡献不大,这一结论也说明人工湿地对磷的去除主要是依靠基质吸附去除。

4 结论

(1)4种湿地植物的最长根长存在差异,以美人蕉

的最长(43.73 cm),芦苇其次(32.50 cm),黄花鸢尾最短(12.57 cm)。植物根系的体积以美人蕉最大(66.72 cm³),黄花鸢尾最低(4.70 cm³);4种湿地植物的密度以芦苇最高(257株·m⁻²),美人蕉其次(61株·m⁻²),茭白最低(54株·m⁻²)。

(2)单位面积上植物的生物量以芦苇最高(4.27 kg·m⁻²),美人蕉其次(2.12 kg·m⁻²),黄花鸢尾最低(0.78 kg·m⁻²),相应地,植物对氮、磷和锌的吸收量以芦苇最高、美人蕉其次,黄花鸢尾最低。

(3)植物对人工湿地的使用寿命没有显著性影响,植物的最长根长和密度可作为人工湿地基质深度和植物数量配置的依据。

参考文献:

- [1] 韩潇源, 毕继胜, 宋志文. 水生植物在水污染控制中的应用与发展[J]. 青岛理工大学学报, 2005, 26(6): 88-91.
HAN Xiao-yuan, BI Ji-sheng, SONG Zhi-wen. Application and advance of aquatic plants in water pollution control[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2005, 26(6): 88-91.
- [2] 李宗辉, 唐文浩, 宋志文. 人工湿地处理污水时水生植物形态和生理特性对污水长期浸泡的响应[J]. 环境科学学报, 2007, 27(1): 75-79.
LI Zong-hui, TANG Wen-hao, SONG Zhi-wen. Response of the morphological and physiological characteristics of aquatic plants to long-term soaking in the process of constructed wetland wastewater treatment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(1): 75-79.
- [3] 徐德福, 李映雪. 用于污水处理的人工湿地的基质、植物及其配置[J]. 湿地科学, 2007, 5(1): 32-38.
XU De-fu, LI Ying-xue. Screen plants and substrates of the constructed wetland for treatment of wastewater[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(1): 32-38.
- [4] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 308-315.
LU Ru-kun. Agrochemical analyzed method of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishers, 1999: 308-315.
- [5] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?[J]. *Water Science and Technology*, 1997, 35(5): 11-17.
- [6] Anderson T A, Cuthie E A, Walton B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. *Environ Sic Technol*, 1994, 27(13): 2630-2636.
- [7] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究 [J]. 湖泊科学, 2002, 14(12): 179-184.
CHENG Shui-ping, WU Zhen-bin, KUANG Qi-jun. Macrophytes in artificial wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(12): 179-184.
- [8] Adcock P W, Ganf G G. Growth characteristics of three macrophyte species growing in a natural and constructed wetland system[J]. *Wat Air and Soil Pollution*, 1987, 5(2): 15-19.
- [9] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrate in constructed wetland systems[J]. *Water Re*, 1998, 32(2): 393-399.
- [10] Defu Xu, Jianming Xu, Jianjun Wu, et al. Studies on the phosphorus sorption capacity of substrates used in constructed wetland systems[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(2): 344-352.
- [11] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physicochemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Res*, 1999, 33(17): 3595-3602.