

人工湿地处理生活污水的研究进展

梁 康^{1,2}, 王启烁¹, 王飞华¹, 梁 威^{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.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:近年来,随着工业化城镇化的快速发展,大量生活污水未经处理即排放到自然水体中,导致我国地表水水质显著下降,富营养化现象严重,生活污水的处理日益受到广泛重视。人工湿地被证明是处理生活污水的一种经济有效手段,已成为生活污水处理的重要工艺之一。通过较为系统地综述表面流、水平潜流和垂直流3种流程人工湿地在处理生活污水时常用的植物种类、基质类型、水力负荷及净化效果,总结了目前人工湿地在生活污水处理中存在的一些问题,并展望了其未来发展方向。

关键词:人工湿地;生活污水;植物;基质;水力负荷;展望

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)03-0422-07 doi:10.11654/jaes.2014.03.003

Research Progresses in Domestic Wastewater Treatment by Constructed Wetlands

LIANG Kang^{1,2}, WANG Qi-shuo¹, WANG Fei-hua¹, LIANG Wei^{1*}

(1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Domestic wastewater contains a large amount of nutrients (particularly nitrogen and phosphorus), total suspended solids (TSS) and organic matter, and often causes eutrophication of its receiving water bodies. Treating domestic wastewater has drawn increasing attentions. Constructed wetland systems have showed to be a cost-effective technique for domestic wastewater treatment. This paper summarized commonly used macrophyte species, substrate, hydraulic loading rates (HLR) and removal efficiencies for free surface flow constructed wetlands, horizontal subsurface flow constructed wetlands and vertical subsurface flow constructed wetlands. Further research on constructed wetlands was also proposed.

Keywords: constructed wetland; domestic wastewater; macrophyte; substrate; HLR; prospect

生活污水特征污染物主要为N、P、BOD、COD、动植物油和纤维素等,其中COD、BOD₅、TN、TP的质量浓度分别可达到100~300、50~130、8~40、1~5 mg·L⁻¹ [1-3]。污水的有机污染物浓度较高,可生化性较强。

人工湿地是通过人工模拟自然湿地的结构和功能而设计和建造的湿地。人工湿地主要由基质、植物、微生物等组成,它充分利用物理、化学和生物的三重协同作用,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解等作用来实现对污水的高效净化。研究表明,在进水浓度较低的情况下,人工湿地对BOD₅

的去除率可达85%~95%,对COD的去除率可大于80% [4-6]。人工湿地以其去污效果好、建造运营成本低廉、操作与管理简便等优点,在世界范围内正越来越多地被用于生活污水的处理 [3, 6-10]。

按照废水在湿地中的流程,人工湿地系统主要分为自由表面流人工湿地、水平潜流人工湿地、垂直流人工湿地等类型。湿地流程、植物种类、基质类型及水力负荷是影响人工湿地处理效率的关键因素。本文从植物、基质、水力负荷以及净化效率等几方面对3种类型人工湿地在生活污水处理中的应用进行总结,以期工程实践提供参考。

1 湿地植物

植物是人工湿地的重要组成要素,在水质净化过程中发挥着重要的作用,植物的净化功能与其生长状况及植物间的合理搭配有着密切的关系,湿地植物生

收稿日期:2013-07-10

基金项目:国家“十二五”重大科技专项(2011ZX07303-001);淡水生态与生物技术国家重点实验室开放课题(2013FB16);江苏省科技厅项目(BK20130430, BY2011193)

作者简介:梁 康(1988—),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为环境微生物学等。

* 通信作者:梁 威 E-mail:wliang@ihb.ac.cn

长越好、搭配越合理,对水质的净化功能越强^[11]。

1.1 湿地植物的选取原则

植物在湿地中的作用主要包括通过自身的生长吸收营养物质、根系为微生物提供栖息场所、维持和加强人工湿地内的水力传输、向根系充氧以促进污染物的分解和转化等^[12]。湿地植物分为挺水、浮水和沉水三大类。湿地植物选取的一般原则是适地适种、耐污能力强、根系发达、生物量大等^[13]。

1.2 湿生植物种类及配置异同

表面流湿地类似于自然湿地,污水在湿地表面流动,根据表面流湿地的特点,适宜的植物类型有沉水植物、漂浮植物、挺水植物。根据根系的特征可将挺水植物分为4种类型,即深根丛生型、深根散生型、浅根丛生型和浅根散生型,适宜配置于表面流湿地的有浅根散生型和浅根丛生型两种类型。浅根散生型的一些植物如慈姑、莲藕等,其根系分布一般都在5~20 cm之间^[14]。由于这些植物的根系分布浅,而且一般原生于土壤环境,适宜配置于表流式人工湿地中。浅根丛生型的植物如灯心草、芋头等,根系分布浅,且一般原生于土壤环境,因此仅适宜配置于表面流人工湿地系统中。

垂直流与水平潜流湿地都属于潜流式湿地类型,污水在基质内部流动,基质层的厚度较表流湿地大,两种流程湿地的湿生植物种类及配置基本相同。垂直流与水平潜流湿地中配置的湿生植物均为挺水植物,其中适宜的有深根丛生型、深根散生型两种类型。深根丛生型的植物,其根系的分布深度一般在30 cm以上,可达60 cm,分布较深但分布面积不广。植株的地上部分丛生,如芦竹、旱伞竹、野茭草、薏米、纸莎草等。深根散生型植物根系一般分布于20~30 cm之间,植株分散^[14],这类植物有菖蒲、水葱、蔗草、水莎草等。

在构建人工湿地时,通过进行合理植物配置,既可以快速形成植物群落,又可以提高植物的净化能力及景观价值^[13]。在进行湿地植物配置时必须充分考虑各种植物的优点。从时间尺度来讲,例如多数湿地植物在冬季都会进入休眠状态或者枯萎死亡,严重影响人工湿地冬季的净化效果,利用植物季节性休眠特性,可以给予正确的植物搭配^[15]。如冬季低温时配置水芹菜而夏季高温时则配置水葫芦、大藻等适宜高温生长的植物,以避免因植物品种选择搭配单一而出现季节性的功能失调现象。在北方地区人工湿地植物配置时考虑选用耐寒性强,生物量多,根区丰富的湿地植物^[16],如芦苇、香蒲等。空间尺度则在强调植物去污

效果的同时兼顾景观功能,例如在表面流湿地中进行挺水-浮水-沉水植物的搭配。此外,物种间的合理搭配还具有一定的生态学意义。多物种的生态系统较稳定,不仅保证了物种多样性,而且对病虫害生物防治有非常好的效果^[17];多种植物的搭配不仅在视觉上相互衬托,形成丰富又错落有致的景致,对水体污染物处理的功能也能够加以补充,有利于实现生态系统的完全或半完全自我循环^[18]。

1.3 常用湿地植物种类

芦苇(*Phragmites australis*)与香蒲(*Typha orientalis Presl*)具有分布范围广、生物量大、根系相对发达等特点,是国内外研究应用中普遍使用的湿地植物。Ennabili等对芦苇、香蒲等9种植物的生物量和N、P、K积累量进行了比较,结果表明,芦苇与香蒲的生物量最大,芦苇、香蒲和*Sparganium erectum*具有较高的氮磷吸收能力^[19]。熊纓等进行了不同挺水植物在生活污水中生长量及去污能力比较研究,实验结果显示,芦苇的根系长度(48 cm)远高于美人蕉(30 cm)、风车草(24 cm)和香蒲(18 cm),根系数量以香根草、香蒲、芦苇、美人蕉较多^[20]。人工湿地中常用的植物还有灯芯草(*Juncus effusus*)、美人蕉(*Canna indica*)、茭白(*Zizania aquatica*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、风车草(*Cyperus alternifolius*)、梭鱼草(*Pontederia cordata*)等^[4,21-22]。岳春雷等研究表明,以美人蕉和黑麦草(*Lolium multiflorum*)构成的复合垂直流人工湿地对城市生活污水具有良好的处理效果^[4]。成水平等在城镇污水处理试验中发现,种植水烛和灯芯草的人工湿地基质中N、P的含量分别比无植物的对照基质中的含量低18%~28%和20%~31%^[23]。Zurita等研究了在湿地中种植马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica*)、百子莲(*Agapanthus africanus*)、鹤望兰(*Strelitzia reginae*)、火鹤花(*Anturium andreaeanum*)4种经济植物对生活污水的处理,取得了与常用湿地植物相似的效果,证明了在湿地中种植经济植物的可行性^[24]。陈永华等根据湿地植物实际各项单一指标的比较情况,建立了净化潜力的综合评价体系,把17种植物按照净化能力分为三大类,第一大类为具有较强净化能力的植物:芦苇、千屈菜(*Lythrum salicaria*)、美人蕉、风车草、水葱(*Scirpus validus*)、再力花(*Thalia dealbata*)和花叶美人蕉;第二大类为具有中等净化能力的植物:菖蒲、芦竹、香蒲和梭鱼草;第三大类为具有较弱净化能力的植物:鸢尾(*Iris tectorum*)、野芋(*Colocasia antiquorum*)、灯芯草、葱兰(*Zephyranthes candida*)、泽泻(*Alisma plantago*)和

花蔺蒲(*Iris ensata*)^[25]。此外,与水平潜流及垂直流人工湿地相比,自由表面流人工湿地由于基质上层水位较深,常会用到漂浮植物及沉水植物。王德科等发现,金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、微齿眼子菜(*Potamogeton mackianus*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)和苦草(*Vallisneria spiralis*) 6种水生植物对水中总氮、总磷和硝态氮都有较好的去除效果,尤其以狐尾藻和微齿眼子菜两种植物的效果最好^[26]。Kermal Gunes 等把表面流湿地系统分为三级,第一级与第三级均种植香蒲,中间阶段种植沉水植物给污水增氧,在系统前段强化了污水的硝化作用,为系统末端的反硝化做了准备,整体起到了增强氮去除的效果^[9]。

2 基质

基质一般由土壤、细砂、粗砂、砾石、碎瓦片、粉煤灰、泥炭、页岩、铝矾土、膨润土、沸石等介质中的一种或几种所构成。基质在湿地中的作用主要包括:为植物和微生物提供生长介质,通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物等。基质对污染物的截留有利于后续植物和微生物作用的充分发挥,由于基质的理化性状影响人工湿地的净化能力和运行的稳定性,选择合适的基质能显著提高湿地的污染物处理效率。

自由表面流湿地多以当地自然土壤为基质,在土壤颗粒表面形成一层生物膜,污水流经颗粒表面时,大量的SS和不溶性的有机物被填料阻挡截留,起到沉淀、过滤和吸附的作用。

垂直流和水平潜流湿地基质的选择因特征污染物的不同而不同,同时也会考虑便于取材、经济适用等因素。

(1)对有机物的去除。基质对有机物的去除主要是通过不溶性有机物的沉降、过滤作用,对可溶性有机物吸附作用的去除。一般来说,用潜流湿地处理以SS、COD和BOD为特征污染物的污水时,根据水力停留时间、占地面积和出水水质等限制因素,可以选用土壤、细砂、粗砂、砾石、碎瓦片或灰渣中的一种或几种为基质^[20]。朱夕珍等选取石英砂、煤灰渣和高炉渣为基质构建城市污水处理柱,结果表明,进水COD和BOD₅平均浓度分别为251.29、100.04 mg·L⁻¹时,3种基质对有机物均有较好的去除效果,其中以煤灰渣的效果最佳^[27]。

(2)对氮的去除。人工湿地基质对脱氮的贡献主要是暂时性的吸附氮,然后通过微生物的硝化反硝

化、植物吸收、氨氮挥发等作用去除。张燕等通过等温热力学吸附实验,比较人工湿地的基质高钙废渣、改性赤泥和火山石对污水中氨氮的去除效果。结果表明高钙废渣对氨氮的吸附效果最好^[28]。

(3)对磷的去除。基质主要是通过物理化学吸附作用去除污水中的磷。以除磷为目的的人工湿地最好选择页岩或钢渣为基质,其次是铝矾土、石灰石和膨润土。国内外对不同基质对磷的净化效果的研究较多。Drizo 等综合比较了铝土矿、页岩、沸石、石灰石、轻质陶粒、飞灰、油性页岩7种基质对磷的去除效果,认为页岩对磷的去除效果最好^[21,29]。Sakadevan 等以土壤、沸石、鼓风炉渣、钢炉渣等材料作为人工湿地基质进行了吸附磷的比较。研究表明鼓风炉渣、钢炉渣的吸附效果明显好于其他基质^[30]。

不同的基质组合对污水也具有较强的净化能力。如鲁铤等采用粗砂、粉煤灰、细煤渣、活性炭和空心砖粉块作为基质,并按适当的比例搭配处理低浓度生活污水,结果发现粉煤灰和细煤渣搭配使用能去除70%的COD,粉煤灰和空心砖粉块配合使用的综合效果比较好,能去除89%的NH₄⁺-N和81%的TP^[31]。Liu 等研究认为,具有致密多孔结构的牡蛎壳由于含有大量金属离子,同时具有较高的电导率,使其能有效去除湿地污水中的磷^[32-33]。Guo 将发电厂粉煤灰与土壤按一定比例混合作为湿地基质,对总磷和氨氮均取得了良好的去除效果^[34]。Li 等研究了水淬炉渣在湿地中对磷的吸附解吸效果,发现水淬炉渣比常用的砾石具有更好的磷吸附效果,且它对磷的吸附是不可逆过程^[35]。此外,建筑材料由于含有较多的金属离子,也被用作于湿地基质。Mateus 以葡萄牙大理石^[36]、Yang 等^[3]以建筑垃圾为人工湿地基质处理生活污水取得了良好的除磷效果。

3 水力负荷

水力负荷是影响湿地净化效果的关键因子,通过对水力负荷的优化能显著促进污水净化效果的提高^[37]。Chung 等的研究表明,水力负荷对湿地系统的处理效果有显著影响^[21,38-39]。通常情况下,去除效率会随着水力负荷的降低而增强。在水力负荷较大、处理量较高的情况下,污水在湿地中的停留时间较短,污染物的生化降解作用不充分,出水水质可能不达标。超过最佳水力负荷后,湿地的污染物去除效果会明显降低。水力负荷的选取与所采用的人工湿地类型及污水中污染物负荷有关。一般在处理相同类型污水及其他外

界条件基本一致时,3种基本类型人工湿地设计水力负荷的大小关系是:垂直流湿地>水平潜流湿地>表面流湿地。

表面流湿地在外观形式和功能结构上都类似于天然湿地系统,占地面积较大,水力负荷通常较低,典型水力负荷范围为 $0.5\sim 10\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。Kemal Gunes 等研究表明,系统在 $1.7\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的水力条件下长期运行,对TSS、BOD、TN及TP的去除率分别为86%、92%、56%和43%^[9]。Leah Boutilier 等研究的表面流湿地系统在 $1.4\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 水力负荷条件下,对大肠杆菌、TSS、BOD的长期去除率分别达到95%、69%及78%^[40]。Yu Dong 等研究了表面流湿地系统对村庄生活污水的处理,湿地系统由五块表面流湿地串联组成,五块湿地的平均水力负荷分别为2.44、2.68、1.07、1.61、10.03 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$,总体平均水力负荷约为 $0.54\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$,系统对COD、TSS、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、MRP(Molybdate reactive phosphate)的去除率均在90%以上^[39]。

水平潜流湿地的水力负荷相对较大,典型水力负荷范围一般在 $5\sim 60\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。Dennis Konnerup 比较了5.5、11、22、44 $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 4种不同水力负荷下,水平潜流湿地对校园生活污水TSS的去除率均在88%以上,而对COD、TN、TP的去除率随水力负荷的增大下降较明显^[41]。何成达等研究表明,潜流湿地系统在 $40\sim 60\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的水力负荷运行条件下,对COD、NH₄⁺-N、TP的去除率分别为62.3%、56.5%和83.6%^[42]。

垂直流湿地典型的水力负荷范围为 $5\sim 80\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。龚琴红等发现,垂直流湿地处理低浓度生活污水有较高的去除能力,在 $21.2\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 的水力负荷条件下,湿地对NH₄⁺-N、COD和TN的去除能力能够分别达到93.4%、75.6%和53.8%^[43]。Taniguchi 等研究表明,垂直流湿地在水力负荷 $75\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 对营养物质仍有较高的去除效率^[44]。

4 净化效率

表面流湿地的去污能力高于天然湿地处理系统,它能显著去除有机物,但对氮磷的去除效果有限,与垂直流、潜流式人工湿地相比,其负荷较低,且去污效果相对较差。由于水平潜流湿地充分利用了填料表面生长的生物膜、丰富的植物根系及表层土和填料截留等作用,它对BOD、COD、SS及重金属的处理效果相对较好。垂直流湿地由于排水及间歇阶段大气复氧作用明显,湿地内部溶氧浓度较高,硝化作用较其他两种类型湿地彻底,因而垂直流人工湿地对氨氮的去除率相对

较高^[45],适合处理氨氮含量高的污水。

研究认为,湿地植物在最佳条件下随生物量去除的氮量只占氮去除总量的10%~16%,同时受植物种类和收割频率的影响较大,并不占重要地位^[46],而不同植物对氮磷的去除效果具有差异性^[47]。湿地基质主要通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物,但其本身并不是降解污染物的主要因素。

基质、污染物浓度、水力负荷均为影响湿地净化效果的重要因素,三者相互影响、交互作用。实践中,湿地进水浓度过高,必然加重湿地系统处理污水的负荷,导致系统内部污染物没有足够的时间供生物吸收降解,加速基质堵塞,出水水质不达标,缩短湿地使用年限。若进水浓度低,湿地系统在低负荷而非最佳负荷状态下运行,必然会造成资源的浪费。水力负荷是平衡这二者的主要因素。在一定的有机负荷下,通过水力负荷的调控,使湿地在最佳负荷下运行,在保证污水处理效果的同时,有效防止基质堵塞,延长湿地使用寿命。Hua 等研究了水力负荷及有机负荷对湿地堵塞的影响,认为减小水力负荷及有机负荷能显著延缓堵塞时间,但该研究同时发现,不同水力负荷下出水中的有机物含量均比较低,表明在不同水力负荷条件下堵塞过程的形成机理是类似的^[48]。有机污染负荷是造成堵塞的主要因素,通过加强预处理等措施降低进水有机负荷是防止堵塞的主要手段之一。相比连续进水方式,间歇进水能增强湿地的复氧作用,有效促进生物膜的形成,增强对有机物的降解作用,从而延缓堵塞,延长湿地使用寿命。

此外,湿地净化效果还受到环境温度的影响。Wang 等研究了复合垂直流人工湿地在水力负荷 $60\sim 80\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 时对市政污水的处理,研究表明,夏季湿地系统对COD、NH₄⁺-N和TN的去除率分别为71%、67%和80%;而冬季COD、NH₄⁺-N和TN的最高去除率分别仅为51.71%、19.87%及29.76%^[49]。因此,冬季选择耐寒湿地植物、植物覆盖、地膜覆盖、冰层覆盖是当前几种主要的应对措施^[50-53]。

总之,湿地对污水的净化是湿地流程、植物、基质、水力负荷、污染物浓度及环境温度等多因素共同作用的结果。表面流湿地与垂直流、水平潜流人工湿地相比,其负荷较低,且去污效果相对较差,但因其较为接近天然湿地生态系统、更为经济的建设及维护成本,表流湿地仍有较多的应用。在低温寒冷地区,表流人工湿地因结冰冷冻难以运行,故不适合我国北方地区;垂直流与水平潜流湿地植物与基质选取与配置类

似,在污染物去除方面,二者对有机物均有较好的效果,而垂直流湿地水力负荷较水平潜流湿地高。水平潜流湿地由于大气复氧受限,内部溶氧常供应不足,硝化及反硝化受限。垂直流湿地由于排水及阶段大气复氧作用明显,内部溶氧浓度相对较高,有机物降解及硝化作用较强,反硝化常是脱氮的限制性步骤。垂直流和水平潜流湿地由于其较好的卫生条件及保温效果,是我国北方寒冷地区湿地的首选工艺。

5 问题与展望

截至目前,人工湿地已被证明是处理生活污水的一种经济有效的手段,并且已在国内外得到广泛应用,取得了较理想的效果,成为生活污水处理的主流工艺之一。但从实际运行来看,人工湿地在处理生活污水时还存在一些不足。

第一,水力负荷偏低。与传统污水处理工艺相比,人工湿地具有工艺简单、投资少、净化效果好的优点,但同时存在水力负荷偏低、占地面积偏大的缺点。为了推动湿地在生活污水中的应用,需要对不同流程湿地系统中污水的流体力学特性进行系统研究,深入探讨水力负荷、污水停留时间、出水速率、湿地孔隙率等与净化效果之间的耦合关系^[54],以便为湿地的规划和设计提供理论基础。

第二,湿地堵塞问题。美国 EPA 对实际运行的 100 多个湿地的调查结果显示,将近一半的湿地在运行 5 年后出现了堵塞问题^[55]。堵塞是一个多因素共同作用的结果:一是预处理不到位。污染负荷过大致使大量不溶性有机物进入湿地,在基质内大量积累,从而降低了水力传导性^[56],导致堵塞。预处理可以提高湿地处理效率,减轻湿地系统污染负荷,缓解堵塞的形成,延长使用寿命等。预处理的方法很多,主要有预沉、混凝、过滤、吸附、软化、水解酸化、曝气、消毒等,目前应用的预处理工艺主要有格栅、滤池、沉淀池、曝气池、水解酸化池、氧化塘、消毒池等。二是基质选择或搭配不合理,致使基质比表面积和孔隙率降低。三是水力负荷过大导致有机物短期内大量积累形成湿地水流短路。此外,湿地流程、进水方式不同,污水在基质间流速、流态发生改变也会影响基质堵塞。对此可以通过加强系统进水预处理、基质粒径的合理选择及搭配、采用间歇进水、控制水力负荷及有机负荷、与其他工艺的耦合等途径解决。

第三,除磷能力不足。目前认为基质在除磷过程中发挥的作用最大,而筛选对磷吸附能力较高的基质、研

究新型材料以加强对磷的去除是当前除磷研究的重点之一。植物和微生物的耦合作用也是湿地除磷的一个重要机制。虽然植物和微生物单独作用对磷直接去除贡献率较小,但其协同作用可以通过影响湿地水流流态、供氧能力等改变湿地中磷素的赋存形态,从而促进磷素去除^[57]。可以通过筛选吸收能力强的植物、通过多种植物的优化组合等手段强化湿地对磷的去除等。

第四,设计规范欠缺。人工湿地已在我国广泛应用,但目前国内尚缺乏系统权威的设计、运行和维护规范。笔者认为有关部门应尽快建立健全人工湿地污水处理规程,为湿地规划设计提供合理的参数,从而降低建设风险,促进人工湿地在生活污水处理等领域的健康快速发展^[58]。

参考文献:

- [1] 刘春常,夏汉平,简曙光,等. 人工湿地处理生活污水研究:以深圳石岩河人工湿地为例[J]. 生态环境, 2005, 14(4):536-539.
LIU Chun-chang, XIA Han-ping, JIAN Shu-guang, et al. A case study on domestic wastewater treatment in Shiyanghe constructed wetland in Shenzhen[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4):536-539.
- [2] 何蓉,周琪,张军. 表面流人工湿地处理生活污水的研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2):180-181.
HE Rong, ZHOU Qi, ZHANG Jun. Treating domestic sewage by the free-water surface constructed wetlands[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2):180-181.
- [3] Yang Y, Wang Z M, Liu C, et al. Enhanced P, N and C removal from domestic wastewater using constructed wetland employing construction solid waste(CSW) as main substrate[J]. *Water Science Technology*, 2012, 66(5):1022-1028.
- [4] 岳春雷,常杰,葛滢,等. 利用复合垂直流人工湿地处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7):84-85.
YUE Chun-lei, CHANG Jie, GE Ying, et al. Treatment of domestic wastewater using integrated constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(7):84-85.
- [5] 孙亚兵,冯景伟,田园春,等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):404-409.
SUN Ya-bing, FENG Jing-wei, TIAN Yuan-chun, et al. Treatment of rural domestic sewage with self-aeration subsurface constructed wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3):404-409.
- [6] Saeed T, Afrin R, Mueyed A A, et al. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh[J]. *Chemosphere*, 2012, 88(9):1065-1073.
- [7] Chang J J, Wu S Q, Liang W, et al. Treatment performance of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44:152-159.
- [8] Wu S Q, Chang J J, Liang W, et al. Treatment performance and microorganism community structure response of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater[J]. *Environmental Sci-*

- ence and Pollution Research, 2013, 20:3789-3798.
- [9] Gunes K, Tuncsiper B, Ayaz S, et al. The ability of free water surface constructed wetland system to treat high strength domestic wastewater: A case study for the Mediterranean[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 44:278-284.
- [10] Song Z W, Zheng Z P, Li J, et al. Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 26:272-282.
- [11] Hsua C B, Hsieh H L, Yang C L, et al. Biodiversity of constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10):1533-1545.
- [12] 成水平, 吴振斌, 况琪军. 人工湿地植物研究[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2):179-184.
CHENG Shui-ping, WU Zhen-bin, KUANG Qi-jun. Macrophytes in artificial wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(2):179-184.
- [13] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华, 等. 人工湿地植物的选择[J]. 湖泊科学, 2004, 19(1):91-95.
WANG Sheng-rui, NIAN Yue-gang, HOU Wen-hua, et al. Macrophyte selection in artificial wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 19(1):91-95.
- [14] 李盈盈, 邢晓伟. 人工湿地植物配置的技术与应用[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(15):49-50.
LI Ying-ying, XING Xiao-wei. Plant configuration technologies and applications in constructed wetlands[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2007, 13(15):49-50.
- [15] 李洁, 崔丽娟, 李伟, 等. 兼顾景观功能的人工湿地植物配置模式探讨[J]. 湿地科学与管理, 2013, 9(1):10-13.
LI Jie, CUI Li-juan, LI Wei, et al. Models of deployment of wetland plants in constructed wetland considering landscaping function[J]. *Wetland Science & Management*, 2013, 9(1):10-13.
- [16] Vymazal J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 674(1):133-156.
- [17] 邓辅唐, 李强, 卿小燕, 等. 湿地植物及其工程应用[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2007.
DENG Fu-tang, LI Qiang, QING XIAO-yan, et al. Wetland plants and their applications in engineering[M]. Kunming: Yunnan Scientific Press, 2007.
- [18] 王凌, 罗述金. 城市湿地景观的生态设计[J]. 中国园林, 2004, 1:39-41.
WANG Ling, LUO Shu-jin. The ecological design of wetland in urban landscapes[J]. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, 2004, 1:39-41.
- [19] Ennabili A, Ater M, Radoux M. Biomass production and NPK retention in macrophytes from wetlands of the Tingitan Peninsula[J]. *Aquatic Botany*, 1998, 62:45-56.
- [20] 熊纓, 苏志刚, 高举明. 不同挺水植物在生活污水中生长量及去污能力比较研究[J]. 环境研究与监测, 2010, 23(3):9-13.
XIONG Ying, SU Zhi-gang, GAO Ju-ming. Study on plant growth and pollutants removal capacity of different plants in constructed wetland[J]. *Environmental Study and Monitoring*, 2010, 23(3):9-13.
- [21] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physical-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1999, 33(17):3595-3602.
- [22] Trang N T D, Konnerup D, Brix H, et al. Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: Effects of hydraulic loading rate[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4):527-535.
- [23] 成水平, 夏宜琤. 香蒲、灯心草人工湿地的研究: II. 净化污水的空间[J]. 湖泊科学, 1998, 10(1):62-66.
CHENG Shui-ping, XIA Yi-cheng. Artificial wetland with cattail (*Thypha angustifolia*), rush (*Juncus effusus*): II. Purifying space[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(1):62-66.
- [24] Zurita F, De Anda J, Belmont M A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36:861-869.
- [25] 陈永华, 吴晓芙, 蒋丽鹃, 等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. 生态学报, 2008, 28(8):1549-1554.
CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, JIANG Li-juan, et al. Screening and evaluation of plant purification potential for phytoremediation of sanitary sewage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8):1549-1554.
- [26] 王德科, 李芸云, 李国平, 等. 不同种类的湿地植物积累 Zn 能力的差异及规律研究[J]. 常州工学院学报, 2007, 20(1):39-42.
WANG De-ke, LI Tan-yun, LI Guo-ping, et al. Variations among wetland plant species in Zn accumulation and their rules[J]. *Journal of Changzhou Institute of Technology*, 2007, 20(1):39-42.
- [27] 朱夕珍, 崔理华, 温晓露, 等. 不同基质垂直流人工湿地对城市污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4):454-457.
ZHU Xi-zhen, CUI Li-hua, WEN Xiao-lu, et al. Removal efficiency of different substrates used in vertical constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(4):454-457.
- [28] 张燕, 庞南柱, 蹇兴超, 等. 3种人工湿地基质吸附污水中氨氮的性能与基质筛选研究[J]. 湿地科学, 2012, 10(1):87-91.
ZHANG Yan, PANG Nan-zhu, JIAN Xing-chao, et al. Adsorption properties of three kinds of substrates of constructed wetlands on ammonium nitrogen removal from wastewater and selection of substrates[J]. *Wetland Science*, 2012, 10(1):87-91.
- [29] 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 Science and Technology*, 1997, 35(5):95-102.
- [30] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32(2):393-399.
- [31] 鲁妮, 章北平, 刘真, 等. 人工湿地处理低浓度生活污水的填料优化级配[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(1):81-84.
LU Ni, ZHANG Bei-ping, LIU Zhen, et al. Optimization of constructed wetlands substrate combination treating low concentration domestic sewage[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 28(1):81-84.
- [32] Wang Z, Dong J, Liu C X, et al. Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54:57-65.

- [33] Wang Z, Dong J, Liu C X, et al. Study of oyster shell as a potential substrate for constructed wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(10):2265-2272.
- [34] Guo M F, Xian P, Liu Y Q, et al. Experimental study on seepage and purification of modified fly ash as the substrate of constructed wetlands[C]. *Progress in Environmental Protection and Processing of Resource*, Pts 1-4, 2013:295, 1173-1178.
- [35] Li H B, Li Y, Li X D, et al. Performance study of vertical flow constructed wetlands for phosphorus removal with water quenched slag as a substrate[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 53: 39-45.
- [36] Mateus D M R, Vaz M M N, Pinho H J O. Fragmented limestone wastes as a constructed wetland substrate for phosphorus removal[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 41:65-69.
- [37] 王 鹏, 董仁杰, 吴树彪, 等. 水力负荷对潜流湿地净化效果和氧环境的影响[J]. *水处理技术*, 2009, 35(12):48-52.
WANG Peng, DONG Ren-jie, WU Shu-biao, et al. Influence of hydraulic loading rate on the purifying efficiency and oxygen condition of horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(12):48-52.
- [38] Chung A K C, Wu Y, Tam N F Y, et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(1):81-89.
- [39] Dong Y, Wilinski P R, Dzakpasu M, et al. Impact of hydraulic loading rate and season on water contaminant reductions within integrated constructed wetlands[J]. *Wetlands*, 2011, 31(3):499-509.
- [40] Boutilier L, Jamieson R, Gordon R, et al. Performance of surface-flow domestic wastewater treatment wetlands[J]. *Wetlands*, 2010, 30(4):795-804.
- [41] Konnerup D, Koottatepb T, Brix H. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35:257-258.
- [42] 何成达, 谈 玲, 葛丽英, 等. 波式潜流人工湿地处理生活污水的试验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(4):766-769.
HE Cheng-da, TAN Ling, GE Li-ying, et al. Application of wavy subsurface constructed wetlands for domestic sewage treatment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):766-769.
- [43] 龚琴红, 田光明, 吴坚阳, 等. 垂直流湿地处理低浓度生活污水的水力负荷[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(3):275-279.
GONG Qin-hong, TIAN Guang-ming, WU Jian-yang, et al. Hydraulic loading rate of vertical flow constructed wetland for low-strength domestic sewage treatment[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3):275-279.
- [44] Taniguchi T, Nakano K, Chiba N, et al. Evaluation of extremely shallow vertical subsurface flow constructed wetland for nutrient removal[J]. *Water Science and Technology*, 2009, 59(2):295-301.
- [45] Chang J J, Wu S Q, Liang W, et al. Nitrogen removal from nitrate-laden wastewater by integrated vertical-flow constructed wetland systems[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58:192-201.
- [46] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of Total Environment*, 2007, 380(1/3):48-65.
- [47] 武钰坤, 刘永军, 司英明, 等. 人工湿地不同植物根际微生物群落多样性比较研究[J]. *生态科学*, 2012, 31(3):318-323.
WU Yu-kun, LIU Yong-jun, SI Ying-ming, et al. Study on rhizosphere microbial community diversity of different plants grown in the constructed wetland[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(3):318-323.
- [48] Hua G F, Li L, Shen J Q. An integrated model of substrate clogging in vertical flow constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 119:67-75.
- [49] Wang X, Han B P, Shi Y Z, et al. Advanced wastewater treatment by integrated vertical flow constructed wetland with *Vetiveria zizanioides* in North China[C]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1):1258-1262.
- [50] 申 欢, 胡洪营, 潘永宝. 潜流式人工湿地冬季运行的强化措施研究[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(5):44-46.
SHEN Huan, HU Hong-ying, PAN Yong-bao. Study on enhanced measures for operation of subsurface flow constructed wetlands in winter[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(5):44-46.
- [51] 秦晓丹, 孙贻超, 李 莉, 等. 天津地区表流人工湿地冬季运行工艺研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(15):6841-6843.
QIN Xiao-dan, SUN Yi-chao, LI Li, et al. Study on winter operation process of the surface flow constructed wetland in Tianjin area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(15):6841-6843.
- [52] Wallaces S, Parkin G, Cross C. Cold climate wetlands: Design and performance[J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(11/12):259-265.
- [53] 张 建, 邵文生, 何 苗, 等. 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(8):1560-1561.
ZHANG Jian, SHAO Wen-sheng, HE Miao, et al. Treatment performance and enhancement of subsurface constructed wetland treating polluted river water in winter[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8):1560-1561.
- [54] 梁继东, 周启星, 孙铁珩. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(2):49-55.
LIANG Ji-dong, ZHOU Qi-xing, SUN Tie-heng. A research review and technical improvement analysis of constructed wetland systems for wastewater treatment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(2):49-55.
- [55] Zhang L Y, Zhang L, Liu Y D, et al. Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater[J]. *Desalination*, 2010, 250:915-920.
- [56] Booth D E, Leavitt J. Field evaluation of permeable pavement systems for improved storm water management[J]. *Journal of America Planning Association*, 1999, 65(3):314-325.
- [57] 李晓东, 孙铁珩, 李海波, 等. 人工湿地除磷研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(3):1226-1232.
LI Xiao-dong, SUN Tie-heng, LI Hai-bo, et al. Current researches and prospects of phosphorus removal in constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3):1226-1232.
- [58] 吴树彪, 董仁杰. 人工湿地污水处理应用与研究进展[J]. *水处理技术*, 2008, 34(8):5-9.
WU Shu-biao, DONG Ren-jie. Research advances of constructed wetlands for sewage treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(8):5-9.