

冬小麦和黑麦草作为寒冷季节人工湿地 栽培作物处理城市污水效果研究

任勇翔^{1,2}, 杨春辉¹, 孙军峰¹, 马刚¹, 鲁浩¹, 杨永哲¹, 王志盈¹

(1. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘要:为提高低温时人工湿地对水中污染物的处理效率, 筛选我国北方冬季人工湿地宜栽作物, 在西安市某污水厂建立了中试系统. 系统进水为污水厂初沉池出水, 水培槽为系统预处理设施. 人工湿地分为潜流和垂直流, 深度分别为 0.1 m 和 0.3 m, 栽培作物分别为冬小麦和黑麦草. 研究表明: 冬季人工湿地中的黑麦草仍有较显著分蘖现象, 冬小麦未见分蘖. 冬春季黑麦草湿地系列对 COD、 NH_4^+-N 和 TP 的去除率均高于冬小麦湿地系列, 非结冰期, 0.1 m 黑麦草系列人工湿地 COD、 NH_4^+-N 和 TP 出水浓度可满足城镇污水处理厂国家污水综合排放标准中的二级标准. 黑麦草适宜作为寒冷地区人工湿地栽培作物.

关键词:城市污水; 人工湿地; 冬季; 冬小麦; 黑麦草

中图分类号: X 703

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)05-0714-06

人工湿地作为一种高效、低耗、兼具景观功能的生物—生态污水处理技术, 在国内外得到广泛的应用. 目前研究主要集中在各种类型污水的处理^[1-3]、基质和植物选择^[4-6]、工艺优化设计^[7]、处理效率和稳定性强化^[8]等方面. 植物是人工湿地的重要组成部分, 其主要作用为直接吸收利用污水中的营养物质和富集重金属等有害物质, 输送氧到根区, 满足根区微生物生长、繁殖和降解对氧的需求, 促进湿地生态系统的硝化和反硝化作用, 强化湿地的净化能力^[9]等. 但是植物的生长具有季节性, 因此使人工湿地的处理效果也呈现季节性, 即在植物生长旺盛期湿地处理效果好, 植物枯萎和死亡期处理效果变差. 尤其是我国北方地区, 冬季大部分植物死亡或进入休眠期, 春季植物生长缓慢, 这两个季节人工湿地的运行效率相比夏秋季低很多, 特别是 N、P 等污染物的去除率偏低, 限制了人工湿地工艺在冬季寒冷地区的推广应用^[10]. 现有的研究和工程应用主要选取芦苇、香蒲、茭白和灯芯草等少数几种湿地植物, 在冬季低温时, 湿地植物易出现休眠现象, 根系微生物代谢缓慢, 导致湿地处理效率下降^[11]. 因此, 如何选择适宜冬季气候条件的植物、提高低温条件下人工湿地对水中污染物的处理效率是人工湿地研究领域的一个重要内容.

冬小麦与黑麦草虽为陆生植物, 但环境适应性强、耐水、根系发达, 具有作为湿地冬季植物的理论可行性. 本研究旨在用这两种植物作为湿地栽培作物, 以探讨其在冬春季节以及不同基质深度下的生长状况及对污染物的去除效果, 进而筛选出更适合北方低温条件下生长的人工湿地植物.

1 材料与方法

1.1 试验系统

试验在西安市某污水厂进行, 原水为污水厂初沉池出水, 试验系统流程见图 1. 原水经调节池, 自流入水培槽 (hydroponic ditch, HD), 经泵提依次流入水平流湿地 (horizontal flow constructed wet-

收稿日期: 2012-05-31 修改稿日期: 2012-10-10

基金项目: 国家“水体污染控制与治理”科技重大专项 (2009ZX07212-002-004-003); 住房和城乡建设部 2012 年科学技术项目计划 (2012-7-21); 西安建筑科技大学人才科技基金 (RC0736)

作者简介: 任勇翔 (1968-), 男, 陕西铜川人, 教授, 博士生导师, 主要从事污水生物处理理论与资源化利用.

land, HFCW) 和垂直流湿地 (vertical flow constructed wetland, VFCW). 调节池和水培槽主体均为砖石混凝土结构, 池底及四周池壁均做防水层. 调节池有效容积为 4.5 m^3 , 水力停留时间控制在 3 d 以内. 水培槽共有两组, 其有效容积均为 0.90 m^3 , 池底坡度均为 5‰, 有效水深分别为 0.10 m 和 0.30 m. 其中深度 0.10 m 水培槽为折流式, 池宽 0.6 m, 池长 $5.0 \text{ m} \times 3$; 深度 0.30 m 水培槽池宽 0.6 m, 池长 5.0 m. 水平流湿地长为 2.75 m, 宽为 2.0 m, 池底坡度为 1‰, 布水区长为 0.40 m, 集水区长为 0.35 m. 集水区底部安装 2 根出水管, 出水管与床体液位调节竖管相连. 垂直流湿地长为 2.0 m, 宽为 1.5 m, 床体底部铺设两根穿孔管, 穿孔管进水端与通气管相连, 出水端与液位调节竖管相连. 其中, 栽培床深度为 0.10 m 的湿地床体内铺设 0.10 m 厚的粗砂 (粒径 $2 \sim 4 \text{ mm}$); 栽培床深度为 0.30 m 的湿地床体底部为 0.20 m 厚的细砾石层 ($5 \sim 10 \text{ mm}$), 上部为 0.10 m 厚的粗砂 ($2 \sim 4 \text{ mm}$). 另外, 在湿地旁空地分别种植冬小麦与黑麦草作为陆地对照组, 进水条件与试验系统相同.

2010 年 11 月底, 直接将农田里株高 15 cm 左右的冬小麦根部泥沙冲净后, 移植到系统中, 2011 年 6 月收割. 2011 年 11 月中旬, 将草坪中的黑麦草统一修剪至株高约 10 cm 后移植到系统中至试验结束. 冬小麦和黑麦草湿地冬季运行时的第一天分别为 2010 年 12 月 15 号和 2011 年 12 月 15 号, 春季运行时的第一天时间分别为 2011 年 3 月 1 号和 2012 年 3 月 1 号.

水培槽中冬小麦采用传统的泡沫浮床, 株行距均为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. 湿地中株行距均为 $10 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$. 两种植物均先用清水勾兑的污水进行培养一个月, 待植物适应水生环境后直接引入污水. 系统采用间歇式进水方式, 日进水量为 $0.15 \text{ m}^3/\text{d}$.

样品分析按照国家标准方法测定^[12], 系统调试稳定后开始分析, 频度为 1~2 次/周. 采用统计学软件 SPSS 17.0 对数据进行处理分析, 多个样本的均数比较选用最小显著差法, 选用 $P=0.05$ 的显著水平.

2 结果与讨论

2.1 植物生长状况

培养初期两种植物均有所生长, 但随着气温的降低植物逐渐进入休眠状态, 水培槽和湿地中的植物

均出现枯黄, 但两种植物根系生长状况差别明显. 由于人工湿地中的植物生长状态和水培槽相差不大且观察人工湿地中的根系比较困难, 因此主要观察了水培槽中的植物根系生长状况. 由图 2 可以看出, 黑麦草在根系长度和根系数量方面均大于冬小麦, 即使在结冰情况下黑麦草根系仍保持较强的活力. 植物根系的发达程度会

直接影响水中溶解氧(DO)水平^[13], 表 1 所示为试验期间系统的 DO 和氧化还原电位(ORP)的变化. 从表 1 可以看出冬春季黑麦草各个单元出水中的 DO、ORP 值均高于冬小麦. 另外, 结冰前水培槽和人工湿地中的黑麦草仍然存在分蘖现象, 各人工湿地中的平均分蘖数由刚种植时的 3.0 增加到 10.0, 而冬小麦无显著分蘖现象. 说明黑麦草能够快速适应污水环境, 且更耐低温, 休眠期显著短于冬小麦.

进入春季后, 人工湿地中的冬小麦生长速度快于陆地对照组, 尤其水培槽中植株成熟时间早于对照

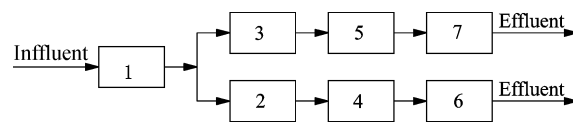


图 1 试验系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of experiment system

1. 调节池 2. 0.1 m 水培槽 (0.1mHD) 3. 0.3 m 水培槽 (0.3mHD) 4. 0.1 m 水平流湿地 (0.1mHF) 5. 0.3 m 水平流湿地 (0.3mHF) 6. 0.1 m 垂直流湿地 (0.1mVF) 7. 0.3 m 垂直流湿地 (0.3mVF).

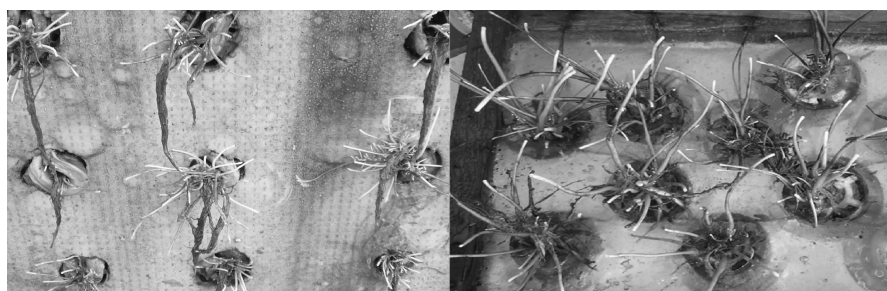


图 2 水培槽中冬小麦和黑麦草冬季根系生长状况对比
(左图为冬小麦, 右图为黑麦草)

Fig. 2 Comparison of *T. aestivum* and *L. perenne* roots in HD systems in winter
(L: *T. aestivum*, R: *L. perenne*)

组约半个月,到五月中旬人工湿地中的冬小麦开始成熟,六月上旬对其进行了收割. 人工湿地中的黑麦草 3、4 月份生长比较旺盛,抽穗后生长速度变缓,在 5 月中旬对黑麦草进行第一次收割,收割后生长速度显著加快.

表 1 各试验单元出水中 DO 和 ORP 浓度
Tab. 1 Changes of DO and ORP in different unit effluent

Items	DO/mg · L ⁻¹				ORP/mv			
	<i>T. aestivum</i>		<i>L. perenne</i>		<i>T. aestivum.</i>		<i>L. perenne</i>	
	Winter	Spring	Winter	Spring	Winter	Spring	Winter	Spring
Influent	0.47	0.31	0.63	0.35	-186.2	-240.0	-169.4	-218.6
Effluent of 0.1mHD	0.88	0.13	1.82	0.70	-162.8	-287.1	-103.7	-149.3
Effluent of 0.3mHD	0.56	0.17	1.56	0.34	-229.8	-289.4	-165.4	-230.4
Effluent of 0.1mHF	1.68	1.12	2.66	2.10	-118.8	-138.4	-98.9	-97.5
Effluent of 0.3mHF	0.67	0.25	1.58	0.56	-231.6	-299.7	-161.0	-214.8
Effluent of 0.1mVF	1.04	0.54	2.27	1.57	-180.0	-156.5	-114.9	-126.8
Effluent of 0.3mVF	0.82	0.24	1.80	0.60	-187.0	-282.7	-116.6	-186.8

2.2 COD 的去除

冬小麦和黑麦草湿地在冬春两季 COD 的进出水浓度变化如图 3、图 4 所示.

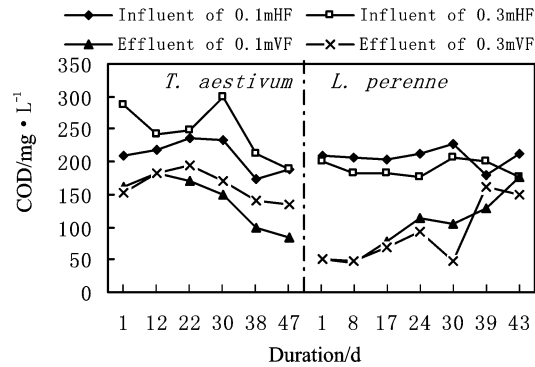


图 3 冬季各系列 COD 进出水浓度变化
Fig. 3 COD variation of the two series in winter

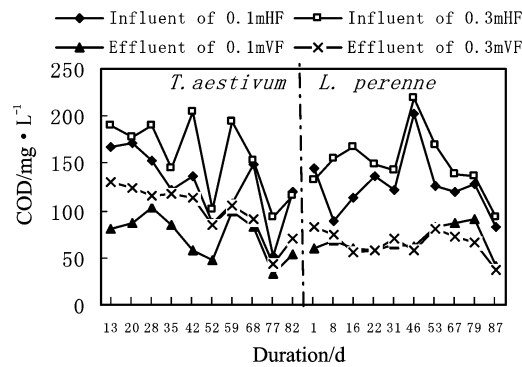


图 4 春季各系列 COD 进出水浓度变化
Fig. 4 COD variation of the two series in spring

由图 3 和图 4 可知,种植冬小麦时,仅春季 0.1 m 系列出水浓度小于 100 mg/L. 种植黑麦草时,冬季和春季的湿地 COD 出水浓度多小于 100 mg/L,但冬季在第 39 d 后由于系统结冰导致 COD 出水浓度大于 100 mg/L.

就栽培植物对 COD 去除的影响而言,冬季 0.1 m 系列中冬小麦和黑麦草湿地对 COD 的去除率分别为 33.3%和 53.5%($P=0.032<0.05$),0.3 m 系列分别为 33.0%和 52.2%($P=0.053>0.05$);春季 0.1 m 系列中冬小麦和黑麦草对 COD 的去除率分别为 39.8%和 39.7%($P=0.995>0.05$),0.3 m 系列分别为 40.6%和 54.7%($P=0.011<0.05$). 以上结果说明:冬季 0.1 m 和春季 0.3 m 湿地中冬小麦和黑麦草对 COD 的去除有显著差异,表明黑麦草更利于对水中 COD 的去除. 这是由于黑麦草根系相对发达,即使在冬季结冰的情况下,黑麦草根系仍保持活性(见图 1)所致. 发达的根系不但有利于对颗粒态 COD 的截留,而且为微生物的生长繁殖提供了更多的表面积,同时根部能分泌较多的氧,利于好氧微生物对 COD 的降解^[14].

就季节对 COD 去除的影响而言,种植冬小麦时,0.1 m 系列和 0.3 m 系列在冬季和春季对 COD 的去除无显著差异($P=0.500, P=0.111>0.05$);种植黑麦草时,0.1 m 系列和 0.3 m 系列在冬季和春季对 COD 的去除也无显著差异($P=0.111, P=0.700>0.05$). 这一结果说明:在相同植物和相同床深的情況下,季节变化对 COD 去除无显著影响. 由表 1 可知,冬小麦和黑麦草冬季各处理单元中的 DO 浓度

高于春季,较高的 DO 浓度弥补了因植物和微生物活性下降的不足^[15]。

2.3 NH_4^+-N 的去除

冬小麦和黑麦草湿地在冬春两季对氨氮的去除效果如图 5、图 6 所示。

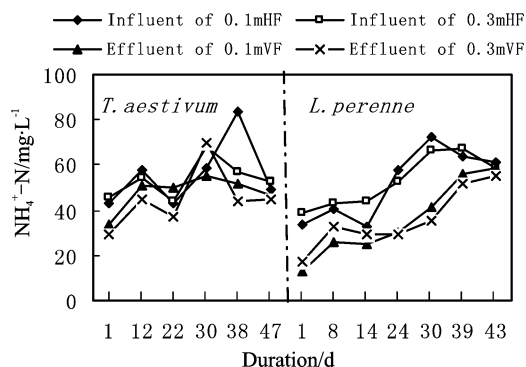


图 5 冬季各系列氨氮进出水浓度变化

Fig. 5 NH_4^+-N variation of the two series in winter

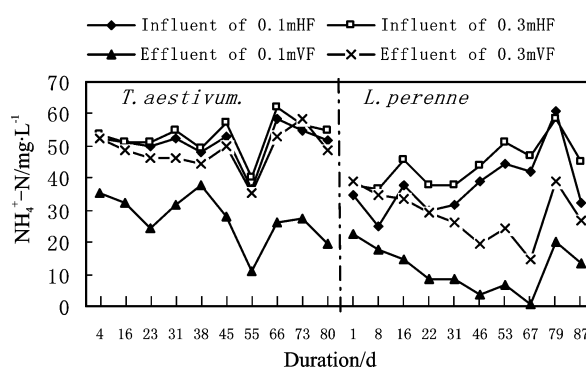


图 6 春季各系列氨氮进出水浓度变化情况

Fig. 6 NH_4^+-N variation of the two series in spring

从图 5 和图 6 可知,种植冬小麦时,冬季和春季两个系列 NH_4^+-N 出水浓度均较高,冬季 0.1 m 人工湿地 NH_4^+-N 出水平均浓度为 48.1 mg/L,春季 0.1 m 湿地 NH_4^+-N 出水平均浓度为 27.3 mg/L. 种植黑麦草时,冬季 0.1 m 湿地 NH_4^+-N 出水浓度多小于 30 mg/L(冬季水温 $T < 10^\circ\text{C}$ 平均出水浓度为 29.8 mg/L),结冰后氨氮出水浓度升高. 分析原因,一方面是由于人工湿地内部温度下降($T < 5^\circ\text{C}$),硝化菌活性受抑制,硝化作用变弱,导致氨氮去除效果下降;另一方面,进水 COD 浓度较高,不利于硝化菌活性的发挥,也导致了氨氮浓度的升高;春季 0.1 m 人工湿地 NH_4^+-N 出水浓度均小于 25 mg/L.

就栽培植物对 NH_4^+-N 去除的影响而言,冬季 0.1 m 系列中冬小麦和黑麦草湿地对 NH_4^+-N 的去除率分别为 11.3% 和 29.4% ($P = 0.104 > 0.05$),0.3 m 系列分别为 16.8% 和 28.2% ($P = 0.134 > 0.05$);春季 0.1 m 系列中冬小麦和黑麦草对 NH_4^+-N 的去除率分别为 47.5% 和 62.1% ($P = 0.039 < 0.05$),0.3 m 系列分别为 9.0% 和 33.3% ($P = 0.000 < 0.05$). 以上结果说明:冬季 0.1 m 和 0.3 m 湿地中冬小麦和黑麦草对 NH_4^+-N 去除无显著差异,而春季 0.1 m 和 0.3 m 湿地中冬小麦和黑麦草对 NH_4^+-N 去除存在显著差异. 由于冬季植物处于休眠期,植物吸收作用几乎停止, NH_4^+-N 主要靠微生物作用去除,冬季人工湿地内部相对充足的 DO 能够使硝化反应顺利进行;春季由于水温的升高湿地内部 DO 浓度下降,并且异养微生物活性增强,消耗了湿地内部的大部分 DO,导致 DO 浓度明显低于冬季,此时湿地内部的 DO 要靠植物根系泌氧来补充,因此泌氧能力强的黑麦草对 NH_4^+-N 去除效果相对好于冬小麦.

就季节对 NH_4^+-N 去除的影响而言,种植冬小麦时,0.1 m 系列在冬季和春季对 NH_4^+-N 的去除有显著差异($P = 0.000 < 0.05$),0.3 m 系列在冬季和春季对 NH_4^+-N 的去除无显著差异($P = 0.058 > 0.05$);种植黑麦草时,0.1 m 系列在冬季和春季对 NH_4^+-N 的去除有显著差异($P = 0.001 < 0.05$),0.3 m 系列在冬季和春季对 NH_4^+-N 的去除无显著差异($P = 0.424 > 0.05$),以上结果说明:当栽培同一植物时,季节变化对 0.1 m 系列 NH_4^+-N 的去除有显著影响. 硝化作用对低温非常敏感,温度低于 10°C 影响明显,而低于 5°C ,硝化作用基本停止^[16]. 基质深度较浅的 0.1 m 人工湿地保温能力弱,受温度影响相对较大,冬季出水水温常低于 5°C ,因此硝化作用受到很大抑制,导致冬季对 NH_4^+-N 的去除率显著低于春季.

2.4 TP 的去除

冬季和春季冬小麦和黑麦草湿地对总磷的平均出水浓度如图 7、图 8 所示。

从图 7 和图 8 中可知,种植冬小麦时冬季和春季总磷出水浓度均较高. 种植黑麦草时冬季和春季 0.1 m 系列人工湿地 TP 出水浓度多小于 3.0 mg/L,但冬季结冰后出水浓度逐渐升高甚至高于进水,与 COD 和 NH_4^+-N 的变化相同,这也是因温度下降导致湿地内部微生物活性下降且结冰后植栽床水力

停留时间缩短所致。

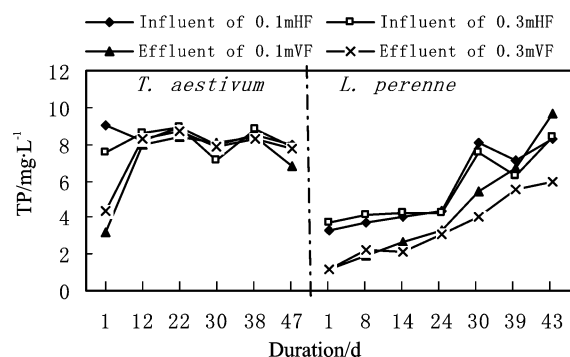


图7 冬季各系列 TP 出水浓度变化情况

Fig. 7 TP variation of the two series in winter

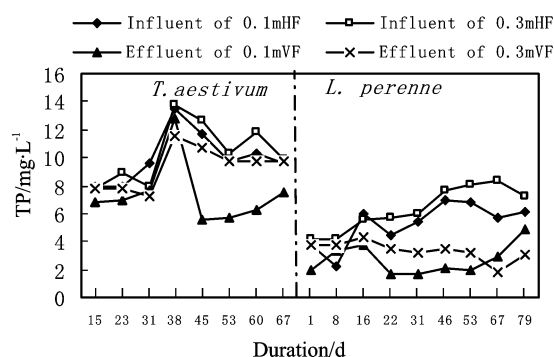


图8 春季各系列 TP 出水浓度变化情况

Fig. 8 TP variation of the two series in spring

就栽培植物对 TP 去除的影响而言,冬季 0.1 m 湿地中冬小麦和黑麦草对 TP 的去除率分别为 14.7% 和 32.7% ($P=0.181>0.05$), 0.3 m 湿地分别为 7.2% 和 42.1% ($P=0.000<0.05$); 春季 0.1 m 系列中冬小麦和黑麦草系统对 TP 的去除率分别为 25.8% 和 37.9% ($P=0.150>0.05$), 0.3 m 系列分别为 11.2% 和 38.2% ($P=0.000<0.05$). 以上结果说明:在相同季节和相同床深的情况下,栽培植物对 0.3 m 系列中 TP 的去除有显著影响.这应与 0.3 m 人工湿内部 DO 浓度相对较低有关,其内部的 DO 要靠植物根系分泌来补充,而 0.1 m 人工湿地由于基质较浅,大气复氧作用强,对植物泌氧作用的依赖程度较弱。

就季节对 TP 去除的影响而言,种植冬小麦时,0.1 m 系列和 0.3 m 系列在冬季和春季对 TP 的去除无显著差异 ($P=0.252, P=0.502>0.05$); 种植黑麦草时,0.1 m 系列和 0.3 m 系列在冬季和春季对 TP 的去除亦无显著差异 ($P=0.569, P=0.568>0.05$). 以上结果表明:在相同植物和相同床深的情况下,季节变化对 TP 去除无显著影响.这与基质对 TP 的吸附和截留作用是湿地除磷主要机理^[17-18]的结论一致。

3 结 论

(1) 冬季人工湿地中的黑麦草仍具有较强分蘖能力,而冬小麦不存在分蘖现象,黑麦草湿地系列对 COD、 NH_4^+-N 和 TP 的去除效果优于冬小麦湿地系列,黑麦草适宜作为寒冷地区人工湿地栽培作物;

(2) 季节对湿地 COD 和 TP 的去除无显著差异,但 0.1 m 系列湿地中 NH_4^+-N 的去除受季节影响显著;

(3) 非结冰期,0.1 m 黑麦草系列人工湿地 COD、氨氮和总磷出水浓度可满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的二级标准.结冰会导致人工湿地对水中污染物去除效率下降,此时应减小水力负荷。

参考文献 References

- [1] CALHEIROS Cristina S C, RANGEL António O S S, CASTRO Paula M L. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater[J]. Water Res., 2007, 41(8):1790-1798.
- [2] HENCH Keith R, BISSONNETTE Gary K, SEXSTONE Alan J, et al. Fate of Physical, Chemical, and Microbial Contaminants in Domestic Wastewater Following Treatment by Small Constructed Wetlands[J]. Water Res., 2003, 37(4):921-927.
- [3] BELMONT Marco A, CANTELLANO Eliseo, THOMPSON Steve, et al. Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico [J]. Ecological Engineering, 2004, 23(4-5):299-311.
- [4] 李剑波, 闻岳, 赵星洁, 等. 有机物对人工湿地基质除磷影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7):1880-1883.
LI Jian-bo, WEN Yue, ZHAO Xing-jie, et al. Effect of organic matter on phosphorus removal for substrate in constructed wetland [J]. Environmental Science, 2008, 29(7):1880-1883.
- [5] 余占环, 丁志斌, 查湘义, 等. 不同人工湿地基质的吸磷特性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(13):80-82.
YU Zhan-huan, DING Zhi-bin, ZHA Xiang-yi, et al. Phosphorous adsorption characteristics of difference substrate in constructed wetland [J]. China Water and Wastewater, 2009, 25(13):80-82.
- [6] SUN Guang, MA Yong-sheng, ZHAO Ran. Purification efficiency of sewage in constructed wetlands with different

- plants [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(6): 2192-2194.
- [7] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters[M]. Washington, D. C. , EPA 625/R-99/010. US, 1999.
- [8] 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 and Wastewater. 2007, 23(5):44-46.
- [9] REN Yong-xiang, ZHANG Hai, WANG Chao, et al. Effects of the substrate depth on purification performance of a hybrid constructed wetland treating domestic sewage [J]. Journal of Environmental Science and Health Part A, 2011,46:777-782.
- [10] 田新源,李 燕,郭 萧. 5 种水生植物冬季水质净化效果的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(35): 20325-20326, 20387.
TIAN Xin-yuan, LI Yan, GUO Xiao. Water quality purifying effect of five kinds of aquatic plants in winter [J]. Journal of Anhui Agr. Sci. 2010, 38(35): 20325-20326, 20387.
- [11] 蒋永荣,莫德清,段钧元,等. 不同植物配置人工湿地冬季生活污水净化效果比较[J]. 水资源保护,2009, 25(3).
JIANG Yong-rong, MO De-qing, DUAN Jun-yuan, et al. A comparison of treatment of sanitary wastewater in winter by different plants in constructed wetlands [J]. Water Resource Protection. 2009, 25(3).
- [12] 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.
State Environmental Protection Agency. Water and Wastewater Monitoring Methods[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] SONG Hai-liang, NAKANO K, TANIGUCH T, et al. Estrogen removal from treated municipal effluent in small -scale constructed wetland with different depth[J]. Bioresource Technology, 2009,100:2945-2951.
- [14] 王 超,任勇翔,张 海,等. 水培技术作为人工湿地预处理工艺可行性研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(8): 1079-1085.
WANG Chao, REN Yong-xiang, ZHANG Hai, et al. Feasibility study of hydroponic cultivation as a pretreatment process of construction wetland [J]. China Environmental Science, 2010, 30(8): 1079-1085.
- [15] OTTO R S, PAUL B. Hook Temperature, Plants and Oxygen: How Does Season Affect Constructed Wetland Performance[J]. Environmental Science and Health, 2005, 40:1331-1342.
- [16] 崔玉波,姜廷亮,郭智倩. 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):121-125,148.
CUI Yu-bo, JIANG Ting-liang, GUO Zhi-qian. Nutrients removal mechanisms and performance of constructed wetlands in cold climate [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. :Natural Science Edition, 2008, 40(1):121-125, 148.
- [17] VYMAZAL J, BRIX H, COOPER P F. Removal Mechanisms and Types of Constructed Wetlands [M]. Leiden: BackhuysPublishers, 1998:35, 41-43.
- [18] SAKADEVAN K, BAVOR H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slag and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems [J]. Water Res. , 1998, 32 (2):393-399.

Effects on the wastewater treatment with *Triticum aestivum* L. and *Lolium perenne* L. as cultivated plant in hydroponic ditch and hybrid constructed wetland in cold season

REN Yong-xiang^{1,2}, YANG Chun-hui¹, SUN Jun-feng¹, MA Gang¹,
LU Hao¹, YANG Yong-zhe¹, WANG Zhi-ying¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055,China)

Abstract: The winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and the lawn plant (*Lolium perenne* L.) were used as cultivated plants in hydroponic ditch and hybrid constructed wetland for enhancing the removal of pollutants (下转第 735 页)

- QI Jian-xun, ZHANG Zhi-guang, KONG Feng. Selection of Suppliers Based on VIKOR Algorithm[C]// Proceedings of the 26th Chinese Control Conference, 2007:146-148.
- [5] Serafim Opricovic, Gwo-Hshiung Tzeng. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. European Journal of Operational Research, 2004, Issue 2(156): 445-455.
- [6] 温海珍,贾生华. 基于特征价格的房地产评估新方法[J]. 外国经济与管理, 2004(6):31-35.
- WEN Hai-zhen, JIA Sheng-hua. New Method on Real Estate Appraisal Based on Hedonic Price Model[J]. Foreign Economies and Management, 2004(6):31-35.

Pricing of real estates based on VIKOR algorithm

LIU Hong-yan, KONG Feng

(Department of Economics and Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: While modifying the factors of a piece of real estate relative to others, most evaluation methods do not take into consideration the regret of individual factors. VIKOR method is an evaluation method that gives compromise solutions for alternatives containing contradictory factors in different units. It can maximize the utility of all the factors and minimize the regret of individual factors, as is most appropriate for the evaluation of real estates. A pricing model based on VIKOR method is proposed in the paper and a numerical example is given to show the effectiveness of the method.

Key words: pricing; real estates; evaluation; VIKOR algorithm

Biography: LIU Hong-yan, Ph. D. Associate Professece. Baoding 071003, P. R. China, Tel: 0086-13903368073. E-mail: l_hy2001@sina.com

(上接第 719 页) in the municipal wastewater in a pilot study. These ecological wastewater treatment system were located in a wastewater treatment plant in Xi'an, China, and the effluent from the primary clarifier in the wastewater treatment plant was intermittently conducted to the experimental systems. The depth of the water in hydroponic ditch and substrate of the horizontal and vertical constructed wetland were 0.1 m and 0.3 m, respectively. The growth status of the two cultivated plants and their effects on the purification of the water quality during winter and spring were also brought into comparison. The results showed that *L. perenne* grew and developed much better than *T. aestivum*. Significant tillers of *L. perenne* and insignificant tillers of *T. aestivum* were both observed during the winter. The concentrations of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in the effluent from *L. perenne* systems with the depth of 0.1 m in winter before freezing were lower than the 2nd class standard as specified in the Chinese Integrated Wastewater Discharge Standard, while only the concentration of COD in the effluent from *T. aestivum* systems with the depth of 0.1 m in spring were below 100 mg/L. Therefore, *L. perenne* is a plant suitable for the constructed wetland, especially in winter in cold regions.

Key words: waste water treatment; constructed wetland; *Triticum aestivum* L.; *Lolium perenne* L.

Biography: REN Yong-xiang, Ph. D., Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82202871, E-mail: ryx@xauat.edu.cn