

河岸荆三棱带改善河水水质的中试研究

李睿华^{1, 2}, 管运涛^{1, 3, 4}, 何苗¹, 胡洪营¹, 蒋展鹏¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 南京大学环境学院, 南京 210093; 3. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 4. 清华-京大环境技术联合研究和教育中心, 深圳 518055)

摘要: 在 1 a 的时间里利用中试规模的荆三棱河岸带对受污染河水进行处理, 主要考察了 COD、 NH_4^+ -N、TP、浊度和水温等水质指标. 结果表明, 荆三棱带在夏、秋季改善河水水质的效果好于冬、春季. 荆三棱带在夏季对 COD、 NH_4^+ -N、TP 和浊度的去除率分别为 44.10%、78.66%、69.44%、99.53%, 在冬季对河水水质也有一定程度的改善. 荆三棱带可以降低河水温度及河水早晚温差, 起到改善局部水环境的作用. 荆三棱带与空白带的对比表明植物对去除水中污染物、改善局部水环境起着重要作用.

关键词: 河流生态修复; 河岸荆; 三棱带; 受污染河水

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1198-06

Pilot-Scale Study on Riparian *Scirpus yagara Ohw* Zone Improving Water Quality of River

LI Rui-hua^{1, 2}, GUAN Yun-tao^{1, 3, 4}, HE Miao¹, HU Hong-ying¹, JIANG Zhan-peng¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 4. Cooperative Research and Education Center for Environmental Technology, Kyoto University & Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: In one year polluted water was treated with *Scirpus yagara Ohw* to investigate its impact on river water quality in pilot scale test, and COD, NH_4^+ -N, TP, turbidity and water temperature were tested. The results show that the *Scirpus yagara Ohw* gives better water quality in summer and autumn than in winter and spring. In summer, the *Scirpus yagara Ohw* zone removes 44.10% of the COD, 78.66% of the ammonia, 69.44% of the phosphorous, and 99.53% of the turbidity. It also can improve water quality to some extent in winter. The *Scirpus yagara Ohw* can reduce effluent temperature and effluent temperature difference between evening and morning and then improve water microenvironment locally. Comparisons between the *Scirpus yagara Ohw* riparian zone and control zone showed that the *Scirpus yagara Ohw* affects importantly on removing pollutants, improving local microenvironment of water.

Key words: river ecological restoration; *Scirpus yagara Ohw*; riparian zone; polluted river water

由于人类对河流的干扰日益加剧, 许多河流已经丧失了原有的自然状态, 失去了其应有的功能, 使河流受到损害^[1]. 在河道浅水处种植水生植物, 恢复河道植物带是一种重要的恢复河流生态系统的措施^[2~4]. 植物带中位于水面下的茎秆及水中的枯枝败叶上会附着大量微生物, 土壤中也会有大量微生物存在, 它们可以降解河水中的营养物质^[5~7], 减轻河流的非点源污染^[8~11]. 另外, 植物可以吸收营养物质, 改善局部环境. 不同水生植物生长特性不同, 由其构成的河道水生植物带对河水水质的改善特点各不相同.

荆三棱(*Scirpus yagara Ohw*)通常在河边、湖岸、沼泽生长, 适应性强, 是湿地生态系统非常重要的一种植物. 本研究模拟河道水生植物带设计了荆三棱中试植物带, 并设置空白带作为对照. 利用它们处理受污染河水, 旨在通过中试了解荆三棱河岸带的各种作用, 为受污染河流的水质净化和生态修复提供

技术基础.

1 试验装置与方法

1.1 河水水质

试验用水直接取自山东省淄博市孝妇河, 河水水质 1 a 中变化较大, COD 为 20 ~ 106 mg/L, NH_4^+ -N 为 3 ~ 36 mg/L, TP 为 0.05 ~ 0.42 mg/L, 河水的可生化性较差, 可生化系数一般只有 0.1 ~ 0.2.

1.2 中试场地及植物种植

中试场地位于山东省淄博孝妇河河滩地上. 图 1 为其平面图. 荆三棱带长 15 m, 宽 10 m, 空白带宽 5 m. 河水通过潜水泵直接打入进水槽, 连续进水, 通过渗流坝使水均匀进入中试荆三棱带, 出水通过渗流坝进入出水槽. 荆三棱带水深从 0 cm 逐渐变为 30

收稿日期: 2006-06-02; 修订日期: 2006-09-27

基金项目: 国家“十五”重大科技专项(2003AA601080)

作者简介: 李睿华(1967~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: liruihua@nju.edu.cn

cm,以模拟河岸水深变化.

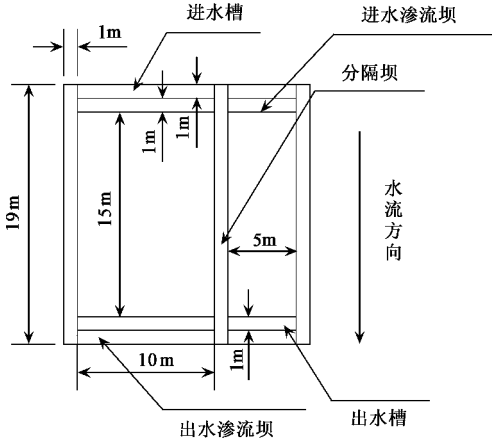


图1 中试场地平面图
Fig.1 Plan of pilot-scale system

中试场地于 2004-05 初移植荆三棱,荆三棱种植方式为行距 25 cm,列距 25 cm,菱形种植,植物 2 400棵左右,随后立即通入孝妇河水.在 5 月底时抽查植物的存活率发现荆三棱基本上全部成活.监测时间从 2004-06-10 ~ 2005-06-01,持续近 1 a.从 2004-06-25 开始调节进水量,通过阀门调节进水量,水力停留时间(HRT)为 2 d 时,水力负荷为 8 cm/d.每周 2 次在进水槽和出水槽取水样进行水质分析.

1.3 分析方法

主要分析项目有 COD、NH₄⁺-N、TP 和浊度等. COD 分析采用重铬酸钾法; NH₄⁺-N 分析采用纳氏试剂分光光度法; TP 采用钼锑抗分光光度法; 浊度采用浊度计测量; DO 和温度用溶解氧测定仪测量.

2 结果与分析

2.1 荆三棱河岸带对 COD 的去除效果

2004 年山东省淄博市夏天的最高气温在 35℃ 以上,不过这样的气温持续一般只有 1 周左右,冬天的最低气温达到 -15℃.淄博市 7 月气温最高,平均气温为 26℃ 左右,1 月气温最低,平均气温为 -3℃ 左右.根据气温的实际情况,将所试验的 1 a 时间分为 4 季,即 2004-06-28 ~ 2004-09-13、2004-09-14 ~ 2004-11-11、2004-11-12 ~ 2005-03-01、2005-03-02 ~ 2005-06-27 分别划定为夏、秋、冬和春 4 季.2004-07-22 ~ 2004-09-02 划定为雨季.

从 2004-06-25 ~ 2004-08-02 共 38 d,中试河岸带进水量为 12 m³/d,水力停留时间大约为 2 d; 08-03

~ 09-13 共 42 d 的时间内中试河岸带的进水量为 24 m³/d,水力停留时间约为 1 d; 09-14 ~ 10-28 共 45 d 内进水量为 36 m³/d,水力停留时间约为 0.7 d; 2004-10-29 以后的所有时间里,进水量为 12 m³/d,水力停留时间约为 2 d.由于泵的流量限制和进水阀门调节的问题,没有在更大范围内进行调节水力停留时间的试验.

图 2 是荆三棱带对河水 COD 的处理效果.表 1 列出了不同季节和水力停留时间时荆三棱河岸带和空白带的平均进出水 COD 浓度和它们对 COD 的平均去除率.从中可以发现在 1a 的时间里,荆三棱中试河岸带进水 COD 在 20 ~ 106 mg/L 内波动,出水 COD 在 9.86 ~ 54.47 mg/L 范围内波动,相应的 COD 的去除率波动范围为 2.73% ~ 70.36%.

夏季,荆三棱河岸带对 COD 的去除率为 44.10%,在 1 a 中最高.空白床的去除率为 31%.在整个夏季进行了水力停留时间为 2 d 和 1 d 的试验,荆三棱河岸带 HRT 为 2 d 时的 COD 去除率为 50.45%,比 HRT 为 1d 时的去除率高 13.42%,而空白河岸带则只有不到 5%.这表明 HRT 的延长有利于对 COD 的去除,尤其有利于荆三棱河岸带对 COD 的去除.

秋季,荆三棱河岸带对 COD 的去除率为 27.86%,为所试验的 1a 中最差,与最好的夏季时的去除效果相比,降低了大约 17%.空白带的去除率为 15.72%,也比夏季降低了 15%.虽然其中有一段的水力停留时间为 0.7 d,使 COD 的去除率降低,但是对整个秋季 COD 的去除率没有根本影响.尽管 COD 去除率在 1 a 中最低,但是荆三棱带与空白带之间的去除率之差有 12.14% 左右,与夏季时的 13% 相当.这充分说明荆三棱在秋季去除河水 COD 中起着重要作用.

冬季,荆三棱河岸带对 COD 的去除率为 41.42%.空白河岸带达到 32.89%,比其夏天时的去除率略高.冬季气温低,微生物没有活性,植物也不生长,但是荆三棱与空白河岸带对 COD 的去除效果却比秋季还好.出现这种情况的原因可能与冬天气温低,在大部分时间里几乎整个中试河岸带的水体都被冻结,水流情况与夏秋差异巨大有关.11 月底中试河岸带水面开始封冻,2004-12-22 第 1 次降雪,中试河岸带冰的厚度达到 2.5 cm,以后随着气温的降低,冰层逐步加厚,到 2005-01-19 时冰厚度达到 11 cm.中试河岸带的浅水水体基本全部封冻,深水水体也大部分被封冻.河水进入中试河岸带后,通过冰与

地面之间的缝隙、土壤间隙流向下部水体. COD 的去
除主要受土壤的过滤、吸附等作用, 而不象其它季节
主要受附着在植物及悬浮于水中的微生物作用.

春季, 荆三棱带对 COD 的去除率为 42.31%, 空
白带的去除率为 33.47%. 两者之间的差距约为

9%, 与冬季时的差距相差无几. 春季气温逐步升高,
植物开始发芽、生长, 微生物活性逐步恢复, 对 COD
的去除率理应比冬季好得多, 但是事实并不如此. 其
原因可能与春季的进水 COD 为 69.78 mg/L, 为 1 a
中最高有关.

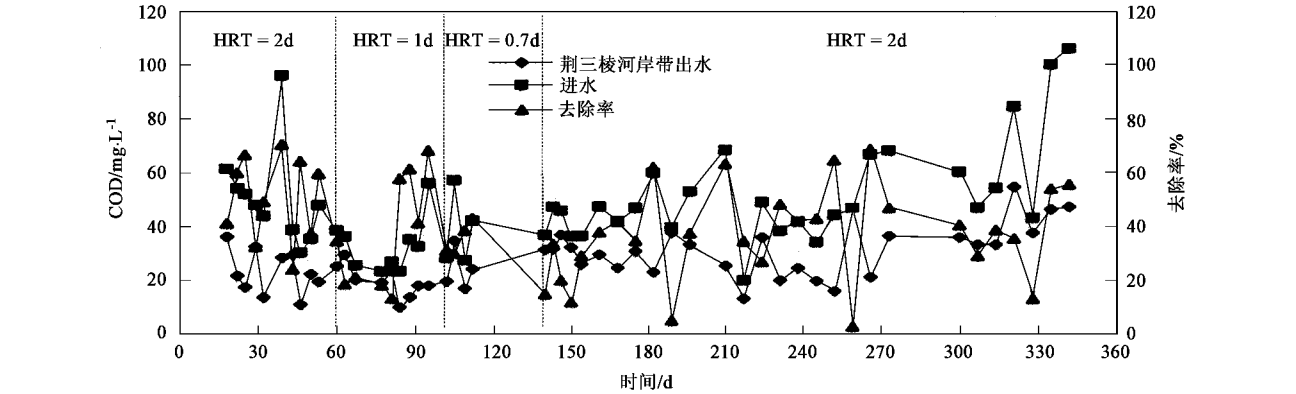


图 2 荆三棱河岸带对 COD 的去除效果(0 点为 2004-06-10)
Fig.2 Removals of COD in *Scirpus yagara Ohw* zone

表 1 荆三棱河岸带在不同季节和水力停留
时间下的平均进出水 COD 与 COD 的去除率
Table 1 Average COD of feed and effluent and COD removals in *Scirpus
yagara Ohw* zone in different seasons and under different HRT

季节	HRT	COD/mg•L ⁻¹			COD 去除率/%	
		进水	空白带	荆三棱带	空白带	荆三棱带
夏	平均	42.31	27.03	21.45	31.06	44.10
	1 d	32.95	22.31	19.57	28.49	37.03
	2 d	50.74	31.28	23.15	33.37	50.45
秋	平均	39.59	32.81	27.98	15.72	27.86
	0.7 d	37.51	30.65	23.63	14.21	33.14
冬	2 d	44.76	29.92	25.46	32.89	41.42
春	2 d	69.78	44.17	38.28	33.47	42.31
雨季		32.50	23.09	20.85	27.01	34.77

2.2 荆三棱带对 NH₄⁺-N 的处理效果

图 3 是荆三棱带对河水中 NH₄⁺-N 的处理效果.
表 2 是不同季节、不同水力停留时间下荆三棱带、空
白带进出水的平均 NH₄⁺-N 浓度与 NH₄⁺-N 的去除
率. 在所监测的 1a 时间里, 进水 NH₄⁺-N 浓度在 3 ~
36 mg/L 之间波动, 荆三棱带出水的波动范围为 0 ~
27.8 mg/L, 荆三棱带对 NH₄⁺-N 的去除率波动范围为
2.4% ~ 100% .

夏季, 荆三棱带对 NH₄⁺-N 的去除效果最好, 去
除率达到 78.66%, 空白带对 NH₄⁺-N 去除率高达
61.07%, 这与空白带中的有一些植物, 水中和土壤
中有大量微生物有关. 出乎意料的是 HRT 为 1 d 时

的去除率比 HRT 为 2 d 时还高. 这可能与 HRT 为 1
d 时, 平均进水 NH₄⁺-N 浓度仅为 6.45 mg/L, 而 HRT
为 2 d 时 NH₄⁺-N 浓度高达 17.02 mg/L 有关.

秋季, 荆三棱带对 NH₄⁺-N 的去除率为 55.97%,
空白带为 37.31%. 反常的是在水力停留时间为 0.7
d 时, 中试河岸带对 NH₄⁺-N 的去除率反而比整个秋
季的去除率高. 这可能与这一期间进水 NH₄⁺-N 浓度
较低, 且该期间处于夏秋之际, 气温相对较高, 且植
物未完全死亡有关.

冬季, 荆三棱河岸带对 NH₄⁺-N 的去除率较低,
只有 26.92%, 与空白带的 25.37% 相差不大. 冬季
气温低, 微生物活性低, 植物的吸收作用消失. 去除
NH₄⁺-N 主要的主要作用为土壤的吸附等物理化学
作用, 因而荆三棱带与空白带相差不大.

春季, 荆三棱带的 NH₄⁺-N 去除率仅为 22.41%.
春季气温升高, 植物开始生长, 微生物活性增加, 但
是荆三棱带对 NH₄⁺-N 的去除率却比冬季时的还低.
主要原因在于进水水质严重恶化, 平均 NH₄⁺-N 浓度
高达 27.7 mg/L, 超过了河岸带去除 NH₄⁺-N 的能力.
不过荆三棱带与空白带之间对 NH₄⁺-N 的去除率之
差为 11.23%, 远大于冬季时的差值. 这充分表明春
季荆三棱在去除 NH₄⁺-N 中的作用.

分析还发现在未进入雨季之前(2004-07-22 之
前)空白带、荆三棱带对 NH₄⁺-N 处理的平均效果分
别为 34.52%、57.88%, 差别为 23.36%. 这说明荆三

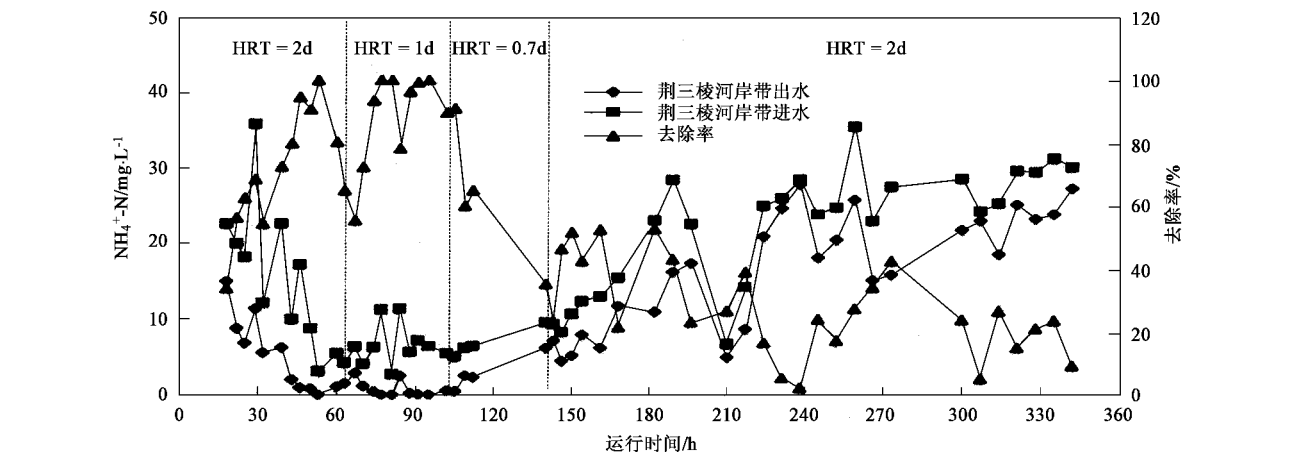


图 3 荆三棱河岸带对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果(0 点为 2004-06-10)

Fig.3 Removals of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in *Scirpus yagara* Ohw zone

表 2 荆三棱河岸带在不同季节和水力停留时间下的平均进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度及其去除率

Table 2 Average $\text{NH}_4^+\text{-N}$ of feed and effluent and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removals in <i>Scirpus yagara</i> Ohw zone in different seasons and under different HRT						
季节	HRT	$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率/%	
		进水	空白带	荆三棱带	空白带	荆三棱带
夏	平均	11.48	5.51	3.20	61.07	78.66
	1 d	6.45	1.90	0.88	66.96	85.42
	2 d	17.02	9.49	5.74	54.59	71.23
秋	平均	8.13	5.54	4.07	37.31	55.97
	0.7 d	5.79	2.76	1.45	54.36	76.30
冬	2 d	20.94	16.03	15.66	25.37	26.92
春	2 d	27.70	24.50	21.55	11.18	22.41
雨季		7.55	1.98	1.10	70.88	84.09
雨季前		21.88	14.55	8.95	34.52	57.88

棱带对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除能力远强于空白带.但是,在雨季期间,空白带和荆三棱带对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为 70.88% 和 84.75%, 差距减小很多.这是因为雨季时水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变小,很容易降解到一定低的程度,因而不能充分显示荆三棱的作用.

2.3 荆三棱带对 TP 的处理效果

河岸带中 TP 的去除主要靠化学沉淀、植物吸收,微生物在其生命活动中会利用一些 P,但是其死亡后又会从细胞中释放出来,因此微生物在河岸带 TP 的去除中所起的作用不大.

图 4 是荆三棱河岸带对 TP 的去除效果.表 3 列出了不同季节和 HRT 下荆三棱带和空白带进出水的平均 TP 浓度和对 TP 的平均去除率.在试验的 1 a 内进水 TP 在 0.082~0.42 mg/L 内波动,荆三棱带出水 TP 在 0~0.168 mg/L 内变化,荆三棱带对 TP 的去除率在 6.12%~100% 内变化.由于在 HRT 为 1 d 和

0.7 d 时取样的次数很少,因此不单独对它们进行讨论.

夏季,荆三棱河岸带对 TP 的去除率为 69.44%,空白带为 41.48%,二者之间的差值高达 29 个百分点,充分显示了荆三棱对 TP 的去除作用.

秋季,荆三棱河岸带对 TP 的去除率为 85.74%,空白带也高达为 66.89%,二者之间的差值约为 20%.这表明秋季植物走向死亡,对 TP 的去除率减弱.空白带的去除率高达 66.96% 应该与土壤的吸附、沉淀的 TP 量变大有关.

表 3 荆三棱河岸带在不同季节和水力停留时间下的平均进出水 TP 浓度及其去除率

Table 3 Average TP of feed and effluent and TP removals in <i>Scirpus yagara</i> Ohw zone in different seasons and under different HRT						
季节	HRT	$\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			TP 去除率/%	
		进水	空白带	荆三棱带	空白带	荆三棱带
夏	平均	0.19	0.09	0.05	41.48	69.44
秋	平均	0.26	0.07	0.02	66.89	85.74
冬	2 d	0.15	0.09	0.06	37.83	53.22
春	2 d	0.20	0.11	0.07	42.30	63.32

冬季,荆三棱带对 TP 的去除率为 53.22%,空白带为 37.83%,二者差别约为 15%,为 1 a 之中最小值.这与冬季植物死亡,对 TP 的去除基本上与土壤的作用有关.

春季,荆三棱带对 TP 的去除率为 63.32%,空白带为 42.30%,二者的差距为 21%,仅仅比夏季时的差距小.春季植物开始生长,荆三棱带与空白带对 TP 的去除率之间的差距变大,进一步表明了荆三棱对 TP 去除的重要作用.

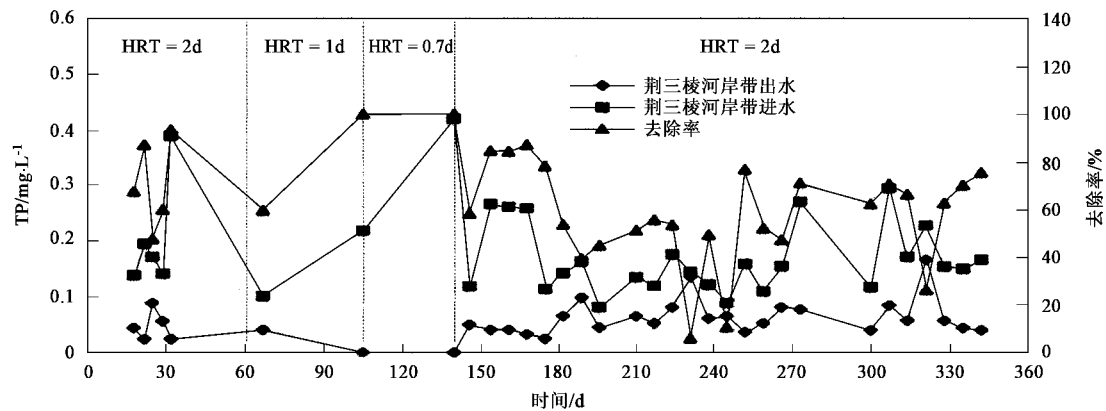


图 4 荆三棱河岸带对 TP 的去除效果(0 点为 2004-06-10)
Fig.4 Removals of TP in *Scirpus yagara* Ohw zone

2.4 荆三棱带对浊度的影响

河水流经中试河岸带时,由于水流变缓,以及受到水中植物附着的微生物等作用,水中的悬浮物会逐步沉积下来,使河水的浊度降低.图 5 为中试河岸

带进出水的浊度.为了便于了解中试河岸带对浊度的去除效果,表 4 列出了中试河岸带在各季节进出水的平均浊度和对浊度的去除率.

1 a 之中,河水的浊度在 13 ~ 287 NTU 之间波

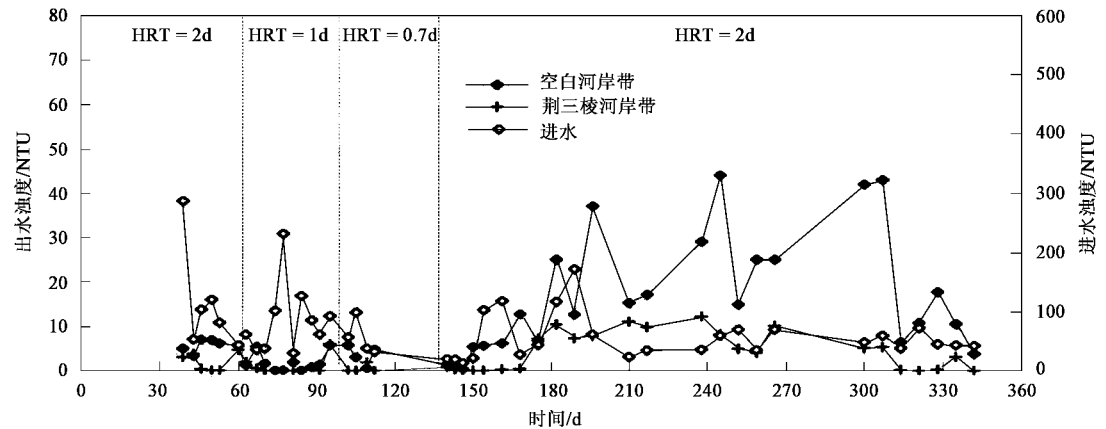


图 5 荆三棱河岸带进出水浊度(0 点为 2004-06-10)
Fig.5 Removals of Turbidity in *Scirpus yagara* Ohw zone

表 4 荆三棱河岸带在不同季节和水力停留时间下的平均进出水浊度及其去除率

季节	HRT	浊度/NTU			去除率/%	
		进水	空白带	荆三棱带	空白带	荆三棱带
夏	总	96.56	3.26	1.34	98.86	99.53
秋	总	44.21	3.11	0.32	98.92	99.89
冬	2 d	64.75	22.3	7.05	87.03	96.91
春	2 d	50.06	20.46	3.13	68.63	96.32

动,空白带与荆三棱带出水分别在 0 ~ 44 和 0 ~ 12 NTU 范围内波动.荆三棱带和空白带夏、秋季出水浊度及对浊度的去除率明显好于冬、春季.一般情况

下,荆三棱带的出水浊度和对浊度的去除率比空白带好很多.这表明荆三棱对水中浊度作用明显.

2.5 荆三棱带出水的 pH

图 6 是荆三棱河岸带在大约 1a 里进出水 pH 的变化情况,从中可以了解河岸带对河水 pH 值的影响.从图 6 可以看出,无论是进水还是出水,无论是荆三棱带还是空白带,pH 在 1a 里基本上在 7 ~ 8 之间变化,没有大的波动.且中试河岸带出水 pH 的波动趋势与进水基本一致,这表明荆三棱带和空白带对 pH 基本上没有影响.

2.6 荆三棱带出水的水温

表 4 列出了荆三棱带和空白带 2004-07、2004-

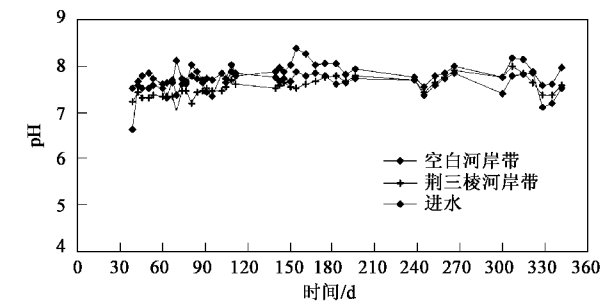


图 6 荆三棱河岸带进出水 pH(0 点为 2004-06-10)

Fig.1 pH of water in *Scirpus yagara* Ohw zone

09、2004-11 和 2005-04 等 4 个月的出水水温及出水早晚温差.空白带出水水温及出水温差明显高于荆三棱带,表明荆三棱对水体起到遮蔽作用,降低出水水温及出水温差,从而起到调节局部水温的作用.

表 5 在不同月份荆三棱与空白带出水月
平均温度及早晚月平均温差¹⁾/℃

时间 /年-月	出水水温		早晚出水温差	
	空白带	荆三棱带	空白带	荆三棱带
2004-07	34.2	28.5	未测	
2004-09	27.0	20.5	7.1	0.9
2004-11	17.0	12.4	6.3	1.2
2005-04	22.6	20.8	11.1	9.1

1)出水水温测试时间为下午 4 点;温差为下午 4 点与早上 9 点出水温差

3 结论

(1)荆三棱河岸带改善河水水质的效果受季节、河水受污染的状况的影响很大.通过荆三棱河岸带处理受污染河水的 1 a 的中试研究,发现夏、秋季的去除效果好于冬、春季,河水水质恶化时,荆三棱带改善河水水质的效果不显著.

(2)荆三棱带对 COD、NH₄⁺-N、TP、浊度在夏、秋、冬、春 4 季的去 除效果分别为 44.10%、27.86%、41.42%、42.31%; 78.66%、55.97%、26.92%、22.41%; 69.44%、85.74%、53.11%、63.32%; 99.53%、99.89%、96.91%、96.32%.荆三棱带对河水 pH 没有影响,可以降低出水水温、稳定出水早晚温差.荆三棱在去除水中污染物、改善局部水环境起着重要作用.

参考文献:

[1] Townsend C R, Riley R H. Assesment of river health: accounting for perturbation pathways in physical and ecological space[J]. *Freshwater Biology*, 1999, **41**: 393 ~ 405.

[2] 封福记, 杨海军, 于智勇. 受损河岸生态系统近自然修复实验的初步研究[J]. *东北师大学报自然科学版*, 2003, **36**: 101 ~ 106.

[3] 郑天柱, 周建仁, 王超. 污染河道的生态修复机理研究[J]. *环境科学*, 2002, **23**(增刊): 115 ~ 117.

[4] 王薇, 李传奇. 河流廊道与生态修复[J]. *水利水电技术*, 2003, **34**: 56 ~ 58.

[5] 王超, 王沛芳, 唐劲松, 等. 河道沿岸芦苇带对氨氮的削减特性研究[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(3): 311 ~ 317.

[6] Jiang S R, Lin Y F, Lee D Y, *et al.* Nutrient removal from polluted river water by using constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2001, **76**: 131 ~ 135.

[7] 张军, 周琪, 何蓉. 表面流人工湿地中氮、磷的去除机理[J]. *生态环境*, 2004, **13**(1): 98 ~ 101.

[8] 董哲仁, 刘蒨, 曾向辉. 受污染水体的生物生态修复技术[J]. *水利水电技术*, 2002, **33**(3): 1 ~ 4.

[9] 刘礼祥, 刘真, 章北平, 等. 人工湿地在非点源污染控制中的应用[J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2004, **21**(1): 40 ~ 43.

[10] Stone K C, Hunt P G, Novak J M, *et al.* In-Stream wetland design for non-point source pollution abatement[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, **19**(2): 171 ~ 175.

[11] Ralf S, Peall S K. Effectiveness of a constructed wetland for retention of nonpoint-source pesticide pollution in the Lourens River catchment in South Africa[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, **35**: 422 ~ 426.