

川蔓藻(*Ruppia maritima*)对滨海城市再生水的净化作用

王卫红¹, 季 民¹, 薛玉伟¹, 张志杨¹, 唐运平²

(1.天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2.天津市环境保护科学研究院, 天津 300072)

摘 要:采用实验室大型光照培养箱方法,研究了生长于滨海咸水湖泊中的沉水植物川蔓藻(*Ruppia maritima*)对再生水景观河道水质中营养盐(根据景观河道再生水盐度实际上下波动范围设 TDS 为 5.67、8.19、10.65 g·L⁻¹ 3 个盐度梯度,在静水中经过川蔓藻净化 10 d。)的去除效果。结果表明,再生水中总磷和氨氮的去除率为 94.41%~95.32%和 96.5%~99.8%,总氮和硝酸盐氮的去除率为 43.4%~45.7%和 44.08%~46.2%;再生水中的溶解氧由 6.6 mg·L⁻¹ 提高到 10.4 mg·L⁻¹。盐度对川蔓藻吸收再生水中营养盐没有显著影响。经计算 1 kg 鲜重的川蔓藻每天可去除 252 mg 总氮、83.16 mg 总磷。川蔓藻是控制含盐量较高的景观水体富营养化的一种优选沉水植物种。

关键词:川蔓藻; 再生水; 营养盐; 盐度

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)04-0775-05

Purification Efficiency of *Ruppia maritima* on Reclaimed Wastewater

WANG Wei-hong¹, JI Min¹, XUE Yu-wei¹, ZHANG Zhi-yang¹, TANG Yun-ping²

(1.School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Academe of Environmental Science, Tianjin 300072, China)

Abstract: Restoration and reconstruction of healthy coastal ecological system using reclaimed wastewater has received significant attention in recent year. When reutilization of reclaimed water on scenic water, controlling the concentration nutriment in reclaimed water becomes a key factor in avoiding eutrophication. Usually a healthy submerged aquatic vegetation ecosystem should be restored or reconstructed in scenic water body, because it can remarkably improve water quality. Finding some aquatic plant species is significant for high salinity reclaimed wastewater in coastal cities of China. While studying an engineering of restoration and reconstruction in an artificial watercourse containing reclaimed municipal wastewater for landscape, we discovered *Ruppia maritima* was a primary colonizer in the natural re-vegetation in saline or brackish waters of ponds and canals in the coastal wet-land of Tianjin, China. The plant can survive in salinities from 0 to 70 g·L⁻¹. This investigation studied purification efficiency of *Ruppia maritima* to nitrogen and phosphorus in reclaimed wastewater. Under three salinity concentrations (EC=10 mS·cm⁻¹, EC=15 mS·cm⁻¹, EC=20 mS·cm⁻¹), *Ruppia maritima* was cultivated for 10 days in reclaimed wastewater, the removal rates of total phosphorus (TP), total nitrogen(TN), nitrate nitrogen(NO₃-N), ammonia nitrogen(NH₃-N) in reclaimed wastewater were found to be 94.41%~95.32%, 43.4%~45.7%, 54.08%~36.2%, 96.5%~99.8%, respectively. The results showed that salinity affected little the removal effect of *Ruppia maritima* to nitrogen and phosphorus in reclaimed wastewater; the removal efficiency of TN and TP in reclaimed wastewater with *Ruppia maritima* were 252 mg·kg⁻¹·d⁻¹ and 83.16 mg·kg⁻¹·d⁻¹, respectively. Dissolved oxygen in reclaimed wastewater from 6.6 mg·L⁻¹ to 10.4 mg·L⁻¹. The results showed that *Ruppia maritima* had higher removal efficiency to nitrogen and phosphorus in reclaimed wastewater; and salinity of ranging between 10 ms·cm⁻¹ and 20 ms·cm⁻¹ had little effect on absorbability of *Ruppia maritima* to nutrient salts; it remarkably improved the reclaimed wastewater quality. *Ruppia maritima* is an available pioneer species for some ecological engineering using reclaimed wastewater in coastal areas of China.

Keywords: ruppia maritima; reclaimed wastewater; nutrient salts; salinity

富营养化是再生水作为娱乐性、观赏性人工水体的最大障碍,控制再生水体中的氮和磷是防止景观水体富营养化的关键。利用大型水生植物对再生水中氮磷和难降解的有机污染物进行吸收、转化及降解,从而使水体得到净化,具有处理效果好、工程造价相对较低、不需耗能、运行成本低廉等优点。如何在景观水体中建立完善的生态系统,选择适应于生长介质的水生植物种类是关键。尤其沉水植物的构建可以有效增加空间生态位,抑制生物性和非生物性悬浮物,改善水下光照和溶氧条件,通过与浮游藻类争夺营养、光照而有效抑制浮游藻类的过量生长,从而提高水体的透明度,提高水体的自净能力。

在天津经济技术开发区(简称泰达),不仅土壤、浅层地下水的含盐量极高,而且用于景观环境用水的再生水水源的含盐量也达到 3 000~5 000 mg·L⁻¹。如何针对泰达再生水河道的土壤、地下水、污水含盐量本底值高的特点,构建较高盐度条件下景观河道中的沉水植被系统,防止再生水河道水体富营养化,筛选出既耐盐又对氮磷吸收较好的沉水植物种是关键。国内外有关防治淡水湖泊富营养化的沉水植物研究以及工程实例有很多,但对筛选耐盐的沉水植物治理咸水富营养化的研究未见相关报道。

经查阅文献和大量的野外调查发现,川蔓藻(*Ruppia maritima*)是天津滨海咸水湖泊发生自然恢复的先锋植物。它是底栖的水生维管束植物,世界广布种,也是一种广盐性的沉水植物,在盐度为 0 到 7%的范围内都能存活(Kantrud, 1991)^[1]。川蔓藻具有很强的繁殖能力,不但能以种子进行有性繁殖,而且还能以它们的分枝或地下茎进行营养繁殖。它靠地下匍匐茎和叶吸收营养,根系不发达^[1-2],植物体的断片可以附着长成新枝。川蔓藻不仅是河口生态系统中重要的初级生产力,还是许多水禽、鱼类和水生无脊椎动物的饵料^[1]。许多研究表明,盐度和浊度是限制川蔓藻生长和分布的主要非生物因子(Verhoeven, 1979; Bonis 等, 1993; Schutten 等, 1994)^[3]。由于泰达再生水的处理工艺使用了连续微滤膜(CMF)技术,使水体浊度较低(0.3NTU~1.5NTU),为人工河道中沉水植被系统的构建提供了极好的光照条件,但较高的含盐量又限制了一些沉水植物的生长。因此,筛选和研究既耐盐又对水体净化能力好的沉水植物,能为滨海湿地的生态恢复工程提供理论依据和植物工程材料。

本文研究了沉水植物川蔓藻对天津泰达再生水河道水质的净化作用,目的是为滨海咸水富营养化的

防治提供构建沉水植被的一种优选植物种,同时对我国河口退化生态系统的恢复与重建具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理方法

川蔓藻(*Ruppia maritima*)采自天津经济技术开发区已废弃的晒盐池,于泰达人工河道再生水中预培养 3 d,选取生长良好、长势一致的植株用作试验材料。试验用水取自泰达新水源厂 CMF 出水口(处理工艺为 SBR + CMF)。再生水中营养盐的浓度为:TN 为 27.65 mg·L⁻¹,NO₃-N 为 16.47 mg·L⁻¹,NH₃-N 为 5.003 mg·L⁻¹,TP 为 4.362 mg·L⁻¹,PO₄-P 为 4.330 mg·L⁻¹,TDS 为 5670 mg·L⁻¹,DO 为 6.6 mg·L⁻¹。

在实验室大型光照培养箱中,取 15 g 川蔓藻先用蒸馏水清洗,再用去离子水漂洗,然后放在装有 3 000 mL 再生水的大烧杯中,根据泰达人工河道再生水盐度实际上下波动范围设 3 个盐度梯度(TDS 为 5.67、8.19、10.65 g·L⁻¹,盐度用 NaCl 调配),光照强度为 5 000 lx,光暗比为 12:12;温度为 25 ℃,每天测定水中总磷和氨氮浓度,每隔 1 d 测定水中总氮和硝酸盐氮浓度。10 d 之后取出称鲜重,105 ℃烘箱中烘至恒重,称量其干重。每一个盐度组设 1 个空白,3 个对照。用黑白瓶法测定川蔓藻的放氧速率,设 1 个空白,3 个对照。

为排除微生物对去除再生水中氮和磷的贡献,设灭菌组和未灭菌组对照。将 250 mL 再生水放入三角烧瓶中,使用高压蒸汽灭菌锅灭菌 1 h,取出放置到室温,加入 1 g 川蔓藻(使用 0.1%的 KMnO₄ 浸泡,去离子水反复漂洗),瓶口覆盖一层抗菌膜,设 1 个空白,3 个对照。每 2 d 测定一次三角瓶中再生水的氮磷浓度。连续测定 10 d。

1.2 水质指标测定方法与数据处理

总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷在水体中的含量测定使用国家环保局编制的《水和废水监测分析方法》中的标准方法,即用碱性过硫酸钾氧化法测定水中总氮,采用纳式试剂光度法测定水中 NH₃-N,采用紫外分光光度法测定水中 NO₃⁻-N,采用钼酸铵分光光度法测定水中总磷,碘量法测定再生水中的溶解氧含量。使用软件 SPSS11.5 进行数据处理与相关性分析。

1.3 总氮、总磷去除率(v)的计算

按下式计算^[4]:

$$v=(C1-C2) \cdot V/(T2-T1) \cdot M$$

式中: v 为去除率(单位生物量的植物在单位时间内吸收水体中总氮或总磷量), $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; V 为实验用水体积, L ; $C1$ 、 $C2$ 分别为 $T1$ 、 $T2$ 时刻的总氮、总磷浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; M 为生物量(鲜重), kg 。使用软件 SPSS11.5 进行数据处理与相关性分析。

2 结果与分析

2.1 川蔓藻对再生水中磷和氮的去除效果

磷既是植物营养三要素之一,又是水体富营养化的限制因素。再生水中的总磷含量较高,且几乎都以磷酸盐的形式存在,而且 pH 为 7.56,通常在 pH 为 7.2 时, $[\text{H}_2\text{PO}_4^-]=[\text{HPO}_4^{2-}]$,而 H_2PO_4^- 是最易被植物吸收的^[5]。从图 1 可以看出,在最初 3 d,川蔓藻表现出“快速”吸收磷的特性,水体中总磷浓度从 $4.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右到 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,几乎呈直线下降,此后速度逐渐减慢。空白中磷的下降在前 4 d 较缓慢,随着水体中微生物的生长,第 5 d 之后加快,到第 9 d 时水体中磷浓度为 $2.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而有川蔓藻生长的水体中磷浓度则下降到 $0.238\sim 0.315\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到了建设部规定的再生水回用于景观水体中磷的排放标准^[6] 即 $\leq 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经相关分析,3 组盐度显著相关($\alpha=0.01$)。经方差检验,在 3 个盐度梯度下川蔓藻对总磷的去除率没有显著的差异($\alpha=0.05$)。

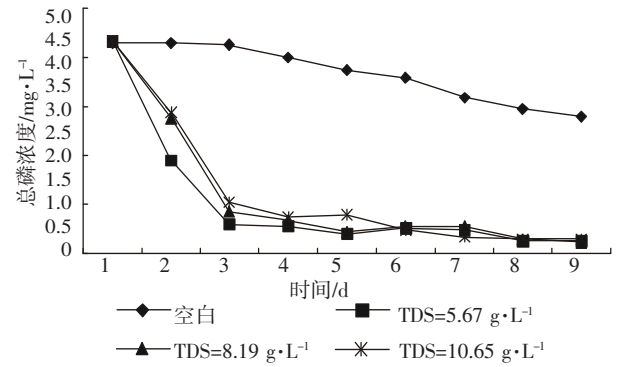


图 1 不同盐度下川蔓藻对再生水体中总磷的去除效果
Figure 1 Change of TP in reclaimed wastewater by ruppia maritia in three salinities

再生水中总氮的含量较高,无机氮的浓度占总氮的 75%左右, NO_3^- -N 的含量几乎是 NH_3 -N 的 3 倍。从试验结果图 2、图 3、图 4 可以看到川蔓藻对氮的吸收表现为优先吸收 NH_3 -N,水体中 NH_3 -N 浓度在前 4 d 为 $5.003\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,6 d 后降到 $0.100\sim 0.169\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经过川蔓藻 10 d 净化的再生水中 NO_3^- -N 的浓度从 $16.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到了 $8.84\sim 9.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;再生水中 TN

的浓度从 $27.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到了 $15.05\sim 15.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。计算可以得知经川蔓藻净化的再生水中无机氮的浓度为 $8.940\sim 9.189\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有机氮的浓度为 $5.861\sim 6.280\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。此浓度小于建设部规定的再生水回用于景观水体中有机氮的排放标准^[6]即有机氮 $\leq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经方差检验,在 3 个盐度梯度下川蔓藻对 NH_3 -N, TN, NO_3^- -N 的去除率没有显著的差异($\alpha=0.05$)。

大量的研究表明沉水植物普遍具有过量吸收营养的特性,而且沉水植物对氨氮比硝酸盐具有吸收优先性^[7]。Thursby and Harlin (1984)的试验表明川蔓藻

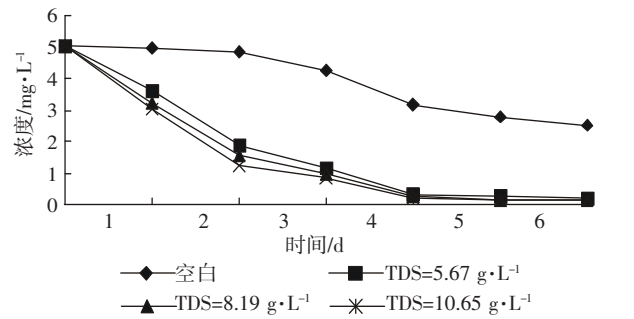


图 2 不同盐度下川蔓藻对再生水中氨氮的去除效果
Figure 2 Changes of NH_3 -N concentration of reclaimed wastewater with Ruppia maritima in three salinities

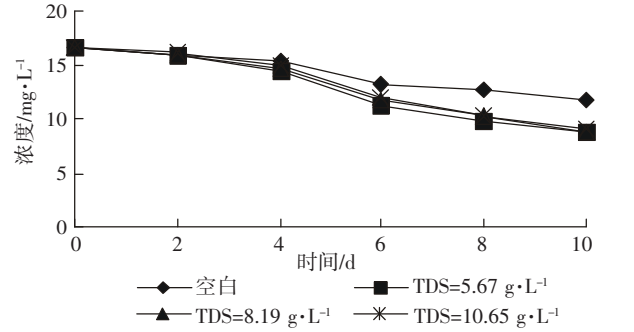


图 3 不同盐度下川蔓藻对再生水中硝酸盐氮的去除效果
Figure 3 Changes of NO_3 -N concentrations in reclaimed wastewater with Ruppia maritima in three salinities

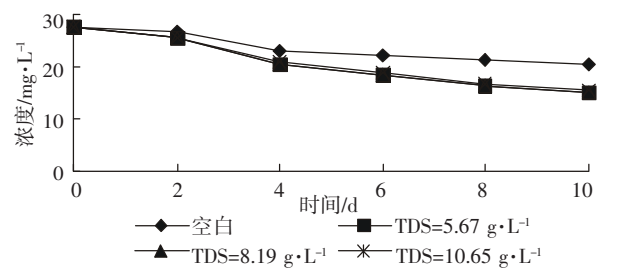


图 4 不同盐度下川蔓藻对再生水中总氮的去除效果
Figure 4 Changes of TN concentrations in reclaimed wastewater with Ruppia maritima in three salinities

通过叶和根吸收无机营养盐氨氮和磷,当水体中同时供给硝酸盐氮和氨氮时,川蔓藻优先吸收氨氮^[8]。本试验也表现出川蔓藻优先利用氨氮的特性。Lukatelich 等(1987)报道在控制川蔓藻的生长中磷似乎比氮更重要^[9],从本试验中可以看到川蔓藻对再生水中磷的去除率较氮高。许多研究大型浮游藻类去除氮的过程和机理文献也表明(Matusiak, 1976.Przytocka,Jusiak 等,1984.Maestrini 等,1986),浮游藻类也是优先利用

NH_4^+-N 和其他还原态氮,同时由于浮游藻类不产生活性的硝酸还原酶,它们对 NO_3^--N 的吸收仅发生在水中 NH_4^+-N 浓度很低或耗尽时。由此可见,大型沉水被子植物川蔓藻与浮游藻类存在营养盐上的竞争,能够抑制浮游藻类的过量生长,防止水体富营养化。盐度是咸水中多种无机盐浓度的一种量度,盐度高低决定咸水渗透压的大小。Pulich (1989)的试验证明,川蔓藻的叶子是主要的营养库并且水体中的营养盐通过叶被利用^[10]。Lesley R.和 Michael J^[11, 12]的研究表明,当盐度从 1%提高到 2%时,川蔓藻的叶的渗透势变化不明显。从本试验结果看,对于广盐性的沉水植物川蔓藻来说,泰达再生水的盐度变化对川蔓藻叶的渗透势影响不大,因此对吸收营养盐的影响不显著($\alpha=0.05$)。

为了了解川蔓藻个体对去除再生水体中氮磷的真正贡献,排除再生水体中微生物对氮磷的贡献,我们设了灭菌组与未灭菌组的对照。因为试验用水取自泰达新水源一厂的 CMF 出口(膜孔径 $\leq 0.2\text{ }\mu\text{m}$),可以认为再生水中微生物数量较少。从图 5 可以看到,灭菌的再生水中总氮也略微有些下降,可能是在取水样时有空气中的微生物进入水体的结果或是川蔓藻植株上残留有附生微生物。相关性分析表明,未灭菌组和灭菌组显著相关($\alpha=0.01$),经方差分析,未灭菌组和灭菌组没有显著差异($\alpha=0.05$);可以看出微生物对去除总氮的贡献较小,约占总去除率的 12.62%。因此再生水体中总氮的去除主要是川蔓藻的吸收作用。

表 1 川蔓藻对再生水体中总氮、总磷的去除率

Table 1 The removal rates of *Ruppia maritima* to TN and TP in reclaimed wastewater body
(R_1 , R_2 , R_3 growing in reclaimed wastewater with TDS of $5.67\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $8.19\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $10.65\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)

项目	TN			TP		
	R_1	R_2	R_3	R_1	R_2	R_3
始浓度 $C1/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	27.65	27.65	27.65	4.362	4.362	4.362
末浓度 $C2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	15.05	14.99	15.65	0.204	0.227	0.244
去除率 $\nu/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$	252	253.2	240	83.16	82.7	82.36
去除效率 $t(C1-C2)/C1$	45.57%	45.79%	43.4%	95.32%	94.8%	94.41%

注: R_1 , R_2 , R_3 指生长在 TDS 为 5.67 、 8.19 、 $10.65\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水体中的川蔓藻。下表同。

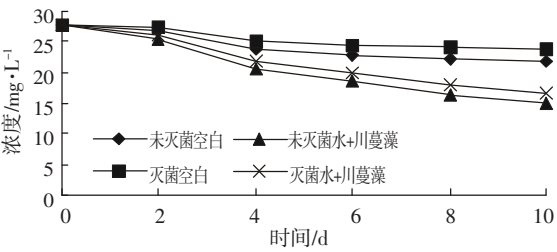


图 5 灭菌与未灭菌水体中总氮的降解曲线比较

Figure 5 Degradation curve of TN concentrations in sterilized and unsterilized reclaimed wastewater with *Ruppia maritima*

2.2 川蔓藻对水体总氮、总磷的去除率

从表 1 来看,1 kg 鲜重的川蔓藻每天可去除 252 mg 总氮,83.16 mg 总磷,在 10 d 之内的去除效率分别达 45.57%、95.32%。由此可见,川蔓藻对再生水体中的氮和磷有较高的去除率。表 2 反映了试验前后川蔓藻的生物量变化,10 d 之内川蔓藻的生物量增加了 14.5%~20.5%,随着盐度增加,川蔓藻的生物量增加。经方差分析,本文所设的 3 组盐度对川蔓藻的生物量有极显著影响($\alpha=0.01$)。Thursby (1984)曾经报道只用天然或人工海水做液体介质培养川蔓藻,当盐度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,川蔓藻的生长量最大^[13]。

2.3 川蔓藻对再生水体中溶解氧的改变

自然光照下,每 1 g 川蔓藻在泰达再生水中每小时可向水体中释放 2.78 mg 氧。从表 1 可以看到泰达再生水体中溶解氧的浓度在 $6.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,而生长有川蔓藻的水体中的溶解氧提高到了 $10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。经方差分析,空白再生水中溶解氧的浓度与生长有川蔓藻的水体中的溶解氧浓度差异极显著 ($\alpha=0.01$)。川蔓藻显著的提高了再生水体中溶解氧的水平。

3 结论

(1)在水体的富营养化中,氨氮所起的作用主要是和决定性的^[14],磷被广泛地认为是藻类生长的主要

表 2 试验前后川蔓藻生物量的变化

Table 2 The change of biomass of *Ruppia maritima* during the experiment

(R₁, R₂, R₃ growing in reclaimed wastewater with TDS of 5.67 g·L⁻¹, 8.19 g·L⁻¹, 10.65 g·L⁻¹)

项目	试验前鲜重/g	试验后鲜重/g	平均干重/g	增长率
R ₁	15±0.01	17.18±0.03	1.73±0.002	14.5%
R ₂	15±0.01	17.78±0.02	1.81±0.001	18.5%
R ₃	15±0.01	18.08±0.02	1.92±0.001	20.5%

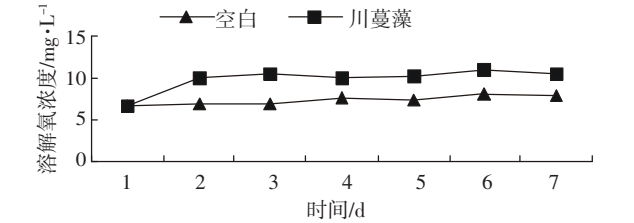


图 7 川蔓藻对再生水中溶解氧的改变

Figure 7 Changes of DO concentrations in reclaimed wastewater with *Ruppia maritima*

限制因子。本试验结果表明,川蔓藻对再生水体中氮氮和磷具有较高的去除率,分别达到 96.5%~99.8%和 94.41%~95.32%。经过川蔓藻的净化,再生水体中氮和磷的浓度都小于建设部规定的再生水回用于景观水体中磷和氮的规定标准,而且显著地提高了水体中溶解氧水平。川蔓藻具有明显改善水质的特性。

(2)在本文所设的 3 个盐度梯度下川蔓藻对氮和磷的去除率没有显著的差异($\alpha=0.05$)。因此,泰达再生水的盐度变化对川蔓藻去除水体中的氮和磷影响不大。但盐度对川蔓藻的生物量影响显著($\alpha=0.01$)。

(3)总之,川蔓藻具有广泛的盐度适应性^[1]和对再生水体中氮磷较高的去除率,它是利用高盐度再生水进行生态修复工程,防治滨海景观水体富营养化的一

种优良先锋植物种。

参考文献:

[1] Kantrud H A. Wigeongrass(*Ruppia maritima* L.): a literature review[J].*US Fish Wildl Serv, Wildl Res*, 1991,10:58.

[2] 颜素珠.中国水生高等植物图说[M].北京:科学出版社,1983.

[3] Moore K A,Neckles H A, Orth R J. *Zostera merina* (eelgrass) growth and survival along a gradient of nutrients and turbidity in the lower Chesapeake Bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*,1996,142:247–259.

[4] 王德荣,崔淑贞,赵 静,等. 水生植物对二级处理水中氮、磷的净化[J]. *环境化学*,1990,9(6):44–48.

[5] CJ/T95–2000,再生水回用于景观水体的水质标准[S].

[6] 廖 红,严小龙.高级植物营养学[M]. 北京:科学出版社,2003.

[7] 刘健康.高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社,2000.

[8] Thursby G B, Harlin M M. Interaction of leaves and roots of *Ruppia maritima* in the uptake of phosphate, ammonia and nitrate[J]. *Mar Biol*, 1984,83:61–67.

[9] Lucateli R J, Schofield N J, Mc Comb A J. Nutrient loading and macrophyte growth in Wilson Inlet, a bar-built southwestern Australian estuary[J]. *Estuarine Coastal Shelf Sci*, 1987,24:141–165.

[10] Pulich W M, Jr. Effects of rhizosphere macronutrients and sulfide levels on the growth physiology of *Halodule wrightii* Aschers. and *Ruppia maritima* L. s.l.[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*,1989, 127:69–80.

[11] Lesley R Murphy, Stephen T Kinsey, Michael J Durako. Physiological effects of short-term salinity changes on *Ruppia maritima*[J]. *Aquatic Botany*,2003,75:293–309.

[12] Boins A,Gillas P, Van Wijck C, Lepart J. The effect of salinity on the reproduction of coastal submerged macrophytes in experimental communities.[J]. *Veg Sci*,1993,4:461–468.

[13] Thursby G B.Nutritional requirements of the submerged angiosperm *Ruppia maritima* in algae-free culture[J]. *Mar Ecol Prog Ser*,1984,16: 45–50.

[14] Takashi Asano.Wastewater reclamation an reuse[M]. Technomic Publishing Company, 1998, 465–471.