第 26 卷 第 1 期 海 洋 通 报 Vol. 26，No.1
2007 年 02 月 JOURNAL OF MARINE SCIENCE BULLETIN Feb. 2007

利用耐盐沉水植物控制滨海再生水景观河道的富营养化研究

王卫红[1]，季民[1]，薛玉伟[1]，唐运平[2]，张志杨[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 300191)

摘 要：研究了由广盐性沉水植物川蔓藻（*Ruppia maritima*）构建的沉水植被系统对滨海再生水景观河道的富营养化控制。实验室静态试验与工程现场中试研究结果表明：由单一广盐性沉水植物川蔓藻构建的沉水植被系统对含盐量 7 000 ~ 13 000 mg/L 的再生水中的氮和磷都有较高的去除率，当河道川蔓藻的生物量达 4 627 g Fw/m^2 时，再生水体中总氮和总磷的去除率分别达到 74.6 % 和 85.4 %。出水氮磷浓度达到了《城市污水再生利用 景观环境用水质》（GB/T18921-2002）的标准。泰达再生水河道中川蔓藻的生物量与河道水体中的叶绿素 a 存在显著的线性负相关。因此，在景观河道之前先构建一个川蔓藻沉水植被系统，对于利用再生水恢复与重建滨海湿地，并控制水体富营养化有重要作用。

关键词：再生水；污水治理；耐盐沉水植物；川蔓藻（*Ruppia maritima*）；富营养化

中图分类号：X55 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-6932(2007)01-0073-0077

将城市再生水作为景观水体利用是污水资源化的一个重要方面。近几年来这方面的实践在我国滨海缺水城市迅速发展。天津泰达再生水景观河道是中国第一个使用经膜过滤的再生水作为唯一水源来恢复与重建滨海湿地的示范工程，它坐落在渤海湾的退海盐荒地上，地貌植被覆盖度几乎为零，生态环境恶劣，为典型的滨海重盐渍荒漠化区。虽然再生水前处理工艺为 SBR + CMF, 但是污水主体是区内生活污水和工业废水，其中工业废水的比例为 60 % ~ 80 %，出水含盐量可达 3 000 ~ 6 000 mg/L，而且水中氮和磷的含量也较高，用于景观水体容易引起富营养化。目前利用水生植物控制水体的富营养化已被证明是一种经济有效的措施 [3, 4]。景观河道土壤的高含盐量 (TDS = 32 250 mg/L) 和缺乏耐盐水生植物种源成为生态技术净化水体的主要限制因子。

关于水生植物选择和净化效果研究文献有很多 [1-5]，但对于既耐盐又对污染物去除好的水生植物，目前国内还没有相关的研究资料。在调查了天津滨海湿地中的植物资源基础上，采集并在实验室筛选出几种耐盐的水生植物，同时分析了泰达再生水的特点，出水浊 < 1.5 NTU，水体透明度极高，为高等沉水植物进一步深度除磷脱氮创造了有利条件。提出在景观河道之前先构建一个人工沉水植被系统，利用高等沉水植物具有快速吸收和过量积累的特性[6]，将再生水体中的氮和磷降到建设部制定的再生水回用于景观水体的水质标准，然后再进入景观河道，达到控制水体富营养化的目的。同时利用再生水进行河道土壤洗盐，逐步将耐受不同盐度的水生植物和沼生植物移植到人工景观河道，增加生物的多样性和生态系统的稳定性，最终达到即净化水体又美化滨海环境的目的。从天津滨海咸水湖泊中筛选出的沉水植物川蔓藻（*Ruppia maritima*），是一种具有广盐性、广泛分布在全世界海岸湿地中的典型沉水植物，在盐度为 0 ~ 70 g/L 的范围内都能存活 [7-10]，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]。本文利用川蔓藻在实验室和工程现场构建了小试和中试规模的沉水植被系统，研究了它对再生水中氮磷的去除效果。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

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

收稿日期：2005-11-07；收修改稿日期：2006-05-23
基金项目：国家 863 攻关课题“天津市滨海新区水环境质量改善技术与综合示范”（2003AA601030）

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

养 3 d, 选取生长良好、长势一致的植株用作实验材料。

实验室静态试验用水取自泰达新水源厂 CMF 出口, 水质浊度 0.5 NTU 。再生水水质 TN, NO_3-N, NH_3-N 浓度分别为 27.65 mg/L, 16.47 mg/L, 5.003 mg/L。TP, PO_4-P 的浓度为 4.316 mg/L, 4.232mg/L。全盐 量（TDS）为 5 600 mg/L。

泰达人工河道底泥全盐量（TDS）为 32 250 mg/L。

1.2 试验方法

1.2.1 静态试验方法 在实验室内取 4 个 3 000 mL 大烧杯，其中两个烧杯中加 500 g 泰达人工河道底泥，然后分别向 4 个烧杯中缓缓装入 3 000 mL 经过孔径 0.45 μm 过滤的再生水；取两份清洗干净并称重的川蔓藻 15 g，其中一份在根部用线系住一个玻璃瓶塞投入没有底泥的烧杯中，另一份则投入加了底泥的烧杯中，并用镊子夹住根状茎轻轻埋入泥里。将这 4 种处理方式即再生水、再生水加川蔓藻、再生水加底泥、再生水加底泥加川蔓藻，各设 3 个平行对照，放入实验室大型光照培养箱中，光照强度为 5 000 lx, 光暗比为 12∶12；温度为 25 ℃，每天上午 9 点取水样，测定水中溶解氧 DO，总磷和氨氮浓度, 每隔 1 d 测定水中总氮和硝酸盐氮浓度。7 d 之后取出称鲜重，105 ℃ 烘箱中烘至恒重，称量其干重。

将 1 g 清洗干净的川蔓藻放在 250 mL 排干净气体的具塞溶解氧瓶中，放置于高 40 cm 装满再生水的塑料桶中，自然光照下放置 2 h，用碘量法测定水中溶解氧，计算川蔓藻的放氧速率。设 1 个空白，3 个对照。

1.2.2 中试试验设计与观测 泰达人工河道水深设计 1.5 m，长 2.3 km。2004 年 2 月将再生水排向景观河道，从排水口到河道长 800 m 处设为中试区。进水量为 4 500 m^3/d 左右，水力负荷 6.6 cm/d，水力停留时间 19 d。进水 TN 浓度范围 12.77 ~ 36.64 mg/L 之间，其中硝酸盐约占 50 %，氨氮浓度较低，平均值仅 3.56 mg/L；总磷浓度范围 1.22 ~ 4.87 mg/L 之间，以磷酸盐为主，约占总磷量的 98 %。

3 — 4 月将在排水口萌发的川蔓藻幼苗少量移植一些到河道中，4 — 5 月随着气温升高，川蔓藻以根状茎迅速繁殖，到 5 月底沉水植物覆盖面积占河道底面积的约 30 % 时开始试验监测，一直监测到 7 月底，每周取水样一次。水样采集方法：从排水口到河道 800 m 处设 4 个采样位点，每个位点平均间隔 200 m， 1# 位点位于进水口，4# 位点位于河道 800 m 处设为沉水植物池的出水口；每个位点沿河道宽度方向均匀布设 3 个采样点，每个采样点取表层和水下 20 cm 处 2 个水样，取 6 个水样等体积混合后作为检测水样。 水样检测项目主要有 TDS, TP, PO_4^{4-}-P, TN, NH_3N, NO_3-N 和叶绿素 a 的浓度。

8 月初调查河道中沉水植物生物量。使用 0.5 m × 0.5 m “带网铁铗法”，设 4 个断面，每一个断面设 6 个样方，共计 24 个样方。

1.2.3 水样检测方法和数据处理 所有指标均采用国家环保局编制的《水和废水监测分析方法》（第四版）中的标准方法检测。将测试结果按天平均计算去除率。使用 SPSS 软件统计分析试验数据。

2 结果与分析

2.1 静态实验结果

为了能够了解川蔓藻在再生水河道中对去除氮和磷的贡献，在实验室尺度上设了 4 种处理方式，目的在于排除水体中微生物、河道底泥本身的吸附与底泥中微生物对去除氮和磷的贡献。表 1 列出了静态实验周期为 7 d 时，4 种处理方式对再生水中营养盐的去除效果以及川蔓藻对营养盐的净去除率。从表中可以看出，有川蔓藻生长的两组对再生水中营养盐的去除率均显著高于无川蔓藻的两组，尤其是对氨氮和磷酸盐的去除率均达到 90 % 以上。经检验，有川蔓藻生长的两组中，川蔓藻对再生水体中 TN，NO_3^--N，NH_4^+-N 的净去除率没有显著差异，而对 TP 的净去除率 59.78 % 和 19.34 % 却存在显著差异。这主要是底泥具有吸附一定量的磷的缘故 [11]。如果将再生水+底泥一组对 TP 的去除率减去再生水一组的值可以看出，底泥吸附了水体中 42.96 % 的磷。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　静态实验周期为 7 d 时 4 种处理方式对再生水中营养盐的去除效果

Tab.1　Removal effect of nutrients in recycled water in four ways after 7 days

处理方式		初浓度 / mg·L^{-1}	末浓度 / mg·L^{-1}	去除率 / %	川蔓藻的净去除率 / %
再生水	TN	27.65	21.27	23.07	
	NO_3-N	16.47	12.80	22.28	
	NH_4-N	5.003	2.520	49.63	
	TP	4.316	2.956	31.51	
再生水+川蔓藻	TN	27.65	15.05	45.57	22.5
	NO_3-N	16.47	8.840	46.33	24.05
	NH_4-N	5.003	0.169	96.62	46.99
	TP	4.316	0.376	91.29	59.78
再生水+底泥	TN	27.65	18.06	34.68	
	NO_3-N	16.47	10.14	37.97	
	NH_4-N	5.003	2.706	45.91	
	TP	4.316	1.102	74.47	
再生水+底泥+川蔓藻	TN	27.65	10.79	60.98	26.3
	NO_3-N	16.47	5.950	65.09	27.12
	NH_4-N	5.003	0.203	95.94	50.03
	TP	4.316	0.267	93.81	19.34

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 98 % 都以磷酸盐的形式存在，而且 pH 为 7.56。通常在 pH = 7.2 时，$[H_2PO_4^-] = [HPO_4^{2-}]$，而 $H_2PO_4^-$ 是最易被植物吸收的[10]。但从图 1 可以看到，沉积物对磷酸盐的吸附远比川蔓藻对磷酸盐的吸收速度快，有沉积物的两组处理经过 1 d 就将再生水中磷的浓度从 4.316 mg/L 降到了 1.402 mg/L 和 1.809 mg/L；而未加沉积物只有川蔓藻生长的两组处理则只降到了 4.282 mg/L 和 3.682 mg/L。经相关分析，水土和水土草这两种处理极显著相关（$r = 0.946$），水草和水土草处理则显著相关（$r = 0.885$）。单因素方差检验表明，川蔓藻和底泥对再生水体中磷的去除影响显著。

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/(g·h) 的氧。图 2 反映了 4 种处理方式下再生水中溶解氧的变化。在实验期内泰达再生水体中溶解氧的浓度一直在 6.6 mg/L 左右，而有川蔓藻生长的两种处理中的溶解氧提高到了 9.0 mg/L 左右和 10.0 mg/L 左右。

从以上静态试验结果分析可以看出，川蔓藻不仅能够去除再生水体中的营养盐，而且还能显著改变水体中的溶解氧，对于改善再生水的水质具有显著的作用。

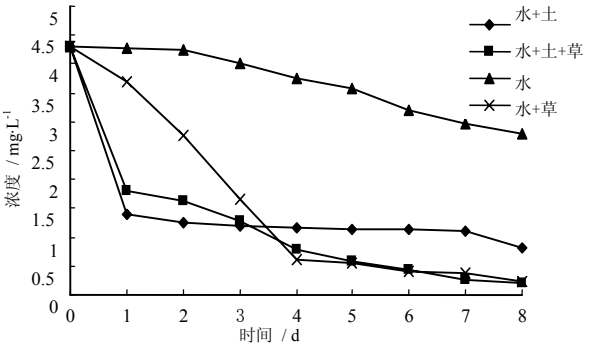

图 1　在四种处理方式下再生水中 TP 浓度随时间的变化

Fig.1　Changes of TP in recycled water in four ways

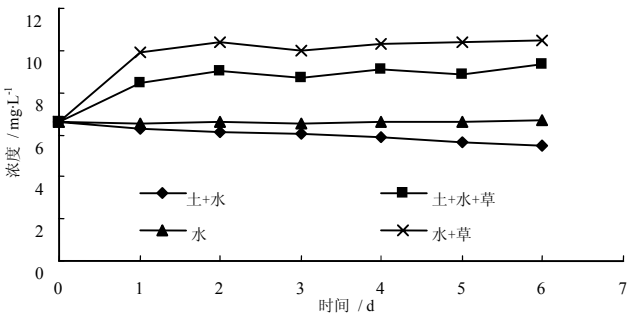

图 2　四种处理方式下再生水中溶解氧的变化

Fig.2　Changes of DO in recycled water in four ways

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 中试实验结果

中试试验从泰达再生水排入河道（河道宽平均 80 m）的 1# 位点到长 800 m 处 4# 位点设为由单一沉水植物川蔓藻构成的沉水植被系统。8 次水质监测结果见表 2。

表 2 4 个监测断面水质和川蔓藻生物量的 8 次监测均值（2004-06-01 — 2004-07-31）

Tab.2 The mean value of 8 monitoring results times of recycled water quality and biomass of Ruppia maritima at four sites from 2004-06-01 to 07-31

监测位点	TN/mg·L^{-1}	NO_3-N/mg·L^{-1}	NH_4^+-N/mg·L^{-1}	TP/mg·L^{-1}	PO_4-P/mg·L^{-1}	DO/mg·L^{-1}	TDS/mg·L^{-1}	叶绿素 a/mg·L^{-1}	川蔓藻生物量/g Fw·m^{-2}
1#	22.15	12.02	2.47	2.87	2.75	9.76	7108	13.79	1667
2#	11.09	7.51	1.42	1.45	1.24	10.5	10060	30.34	1180
3#	8.76	5.79	1.33	1.08	0.93	13.2	10536	44.81	950
4#	5.63	3.13	0.76	0.42	0.35	14.6	13191	49.43	830
去除率/%	74.6	73.9	69.2	85.4	87.3				

表 1 与表 2 比较可以看到，由川蔓藻和再生水以及河道盐土构建的沉水植被系统对于总氮和硝酸盐氮的去除率较实验室静态试验的结果高，而氨氮和磷的去除率较实验室静态试验的结果低。自然状态下，环境中的许多因子对于沉水植物吸收营养盐有很大的影响 [6]。但从出水浓度来看，氮和磷都达到了《城市污水再生利用 景观环境用水质》（GB/T18921-2002）的标准。溶解氧较进水有了显著提高；而盐度和叶绿素 a 在出水口明显增加。盐度的变化说明河道底泥盐土中的盐被溶出，增加了再生水的盐度变化，但川蔓藻仍能正常生长，说明这种沉水植物具有广泛的盐度适应性 [7]。河道再生水体中叶绿素 a 的值代表再生水中浮游植物的种群数量，从表 2 可以看到，在 800 m 长的河道中从入水口至出水口浮游植物生物量逐渐减少。将水体中叶绿素 a 与再生水河道中的川蔓藻的生物量的关系作了对比分析，结果如图 3 所示，两者呈显著的线性负相关，即沉水植物川蔓藻生长密度较高的区域内浮游藻类的生物量较低。再生水体中 N，P 等营养元素既可促进川蔓藻的生长，又能加强藻类的增殖 [12]。在入水口处尽管氮和磷浓度较高，但是由于川蔓藻的生物量较高，则叶绿素 a 较低，本试验的结果表明河道中沉水植物川蔓藻的生物量大小是藻类生长的限制因子。

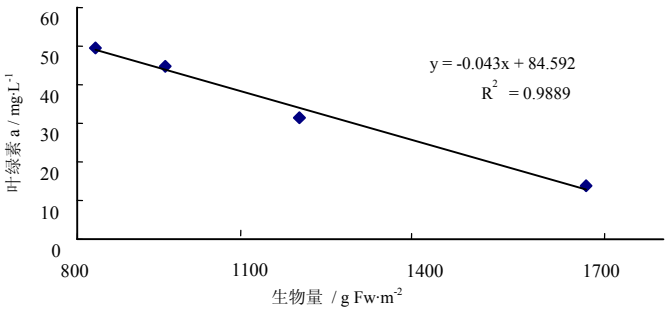

图 3 河道中川蔓藻的生物量与再生水中叶绿素 a 的关系

Fig.3 Correlation curve of biomass of *Ruppia maritima* and Chl.a of the recycled water in the river

3 结 论

小试和中试研究结果表明，川蔓藻能适应泰达再生水河道盐度的变化（TDS = 7 000 ~ 13 000 mg/L）；由单一广盐性沉水植物川蔓藻构建的沉水植被系统对含盐量较高的再生水中的氮和磷有较高的去除率。当河道川蔓藻的生物量达 4 627 g Fw/m^2 时，再生水体中总氮和总磷去除率分别达到 74.6 % 和 85.4 %。出水氮、磷浓度分别为 5.63 mg/L 和 0.42 mg/L，达到了《城市污水再生利用 景观环境用水质》（GB/T18921-2002）的标准。泰达再生水河道中川蔓藻的生物量与河道水体中的叶绿素 a 存在显著的线性负相关。因此，在再生水排入景观河道之前利用构建的川蔓藻沉水植被系统将再生水体中的氮和磷降到再生水回用于景观水体的水质标准，具有一定的可行性，这对于利用再生水恢复与重建滨海湿地，并控制水体富营养化具有重要意义。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 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): 179-183.

[2] 黄承才, 葛滢, 常杰. 泰国强富营养化水中 14 种野生植物蒸腾和营养吸收的相关性 [J]. 浙江林业科技, 1998, 12(6): 3-7.

[3] 朱斌, 陈飞星. 利用水生植物净化富营养化水体的研究进展 [J]. 上海环境科学, 2002, 21(9): 564-569.

[4] 周进, Hisako TACHIBANA, 李伟 等. 受损湿地植被的恢复与重建研究进展 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 561-572

[5] 徐利森. 天津市海岸带滩涂自然特征及其资源评价 [J]. 天津师大学报 (自然科学版), 1992, 2: 62-68.

[6] 刘健康，高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

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

[8] Cook C D K. Aquatic plant book [M]. Netherland: SPB Academic Publishing, 1990.

[9] 颜素珠. 中国水生高等植物图说 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.

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

[11] 丘耀文, 王肇鼎, 高红莲. 大亚湾养殖海区沉积物中营养盐的解吸-吸附 [J]. 热带海洋, 2000, 19(1): 76-79.

[12] 杨清心. 富营养化水体中沉水植物与浮游藻类相互竞争研究 [J]. 湖泊科学, 1996, 8(2)(增刊): 17-24.

作者简介：王卫红（1968 —），女，博士研究生，主要研究方向为水环境污染控制与生态修复。已发表论文 5 篇。E-mail: red_wangwei@163.com

Studies on Controling Eutrophication of Recycled Water Landscape River in the Coastal Area by Submerged Aquatic Vegetation *Ruppia maritima*

WANG Weihong [1], JI Min [1], XUE Yuwei [1], ZHANG Zhiyang [2], TANG Yunping [2]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072;

2. Academe of Environmental Science, Tianjin 300191)

Abstract: The constructed submerged aquatic vegetation system with *Ruppia maritima* was examined for its purification effect of the recycled water in the coastal scenic environment. The purpose of this study is to explore a new method to control eutrophication of the recycled water. Laboratory and field studies showed that the constructed submerged aquatic vegetation system with *Ruppia maritima* had a high efficiency of the removing total N and P from the recycled water with high salinity (TDS = 7 000-13 000mg/L). The field study recorded removal rates of 74.6 % and 85.4 % for the total N and P at a biomass of *Ruppia maritime* of 4 627 g Fw/m^2. The Chlorophyll-a of the recycled water and biomass of *Ruppia maritima* had a significant negative linear correlation. It is suggested that the constructed submerged aquatic vegetation system with *Ruppia maritima* should be considered for controlling eutrophication of recycled water with high salinity used in the coastal scenic environment.

Keywords: recycled water; wasterwater treatment; Submerged Aquatic Vegetation; *Ruppia maritime*; Eutrophication

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net