网络出版时间:2015-06-30 13:47 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.08.015
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150630.1347.015.html

4 种沉水植物对再生水中氮磷的去除速率和耐受范围

徐志嫱[1],刘 维[2],苏振铎[1],高 杨[1]
(1 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048;
2 西北综合勘察设计研究院,陕西 西安 710003)

[摘 要] 【目的】研究 4 种沉水植物对再生水中氮、磷的去除速率和耐受范围,为以再生水作为补水的景观水体沉水植物的选择提供依据。【方法】以野外选取的伊乐藻(*Elodea canadensis*)、罗氏轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、菹草(*Potamogeton crispus*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)4 种沉水植物作为供试材料,设置含不同质量浓度 TN 和 TP 的再生水,测定有这 4 种沉水植物的再生水体中 TN 和 TP 质量浓度的变化,构建 TN 和 TP 质量浓度与培养时间的回归方程,并在回归方程的基础上,研究 4 种沉水植物对再生水中的氮、磷的去除规律。【结果】在有 4 种沉水植物的再生水体中,TN 和 TP 质量浓度均随着培养时间的延长呈负指数衰减变化,沉水植物的净化能力不仅与其种类有关,而且与 TN 和 TP 初始质量浓度相关。罗氏轮叶黑藻对 TN 的去除能力最强,金鱼藻最低;伊乐藻对 TP 的去除能力最强,金鱼藻最小。菹草对氮素的耐受范围较宽,金鱼藻最窄;伊乐藻对磷素的耐受范围最宽,金鱼藻较窄。【结论】当再生水体中 TN 初始质量浓度为 5~15 mg/L、TP 初始质量浓度为 0.5~1.5 mg/L 时,罗氏轮叶黑藻和伊乐藻对氮磷营养盐的去除速率较高,可作为维持和改善再生水景观水体水质的先锋植物。

[关键词] 沉水植物;再生水;去除速率;耐受范围
[中图分类号] X173 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2015)08-0181-08

Removal and tolerance of 4 submerged plants to nitrogen and phosphorus in reclaimed water

XU Zhi-qiang[1], LIU Wei[2], SU Zhen-duo[1], GAO Yang[1]
(1 *Key Laboratory of Northwest Water Resource and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*; 2 *Northwest Research Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi* 710003, *China*)

Abstract: 【Objective】 Nitrogen and phosphorus removal rates and tolerances of 4 submerged plants were studied to provide basis for selection of plants growing in landscape reservoirs supplied with reclaimed water. 【Method】 *Hydrilla verticillata*, *Elodea canadensis*, *Potamogeton crispus* and *Ceratophyllum demersum* were planted in reclaimed water with different total nitrogen (TN) and total phosphorus(TP) concentrations. TN and TP were measured during the experiment and regression equations between concentrations of TN and TP with time were established. Then, the removal of nitrogen and phosphorus was studied. 【Result】 TN and TP dissipated as the increase of plants planting time with negative exponent relationship. The capacity of plants purification is associated with not only plant species but also the TN and TP

[收稿日期] 2014-01-20
[基金项目] 国家自然科学基金项目(51178391);陕西省水利科技计划项目(2013-09);陕西省自然科学基金项目(2012JQ7025)
[作者简介] 徐志嫱(1969—),女,重庆人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事水生态修复与污水处理技术研究。
E-mail:xuzhiqiang@xaut.edu.cn

initial concentration. *Hydrilla verticillata* had the highest TN removal rate in reclaimed water while *Ceratophyllum demersumI* had the lowest. *Elodea canadensis* had the highest TP removal rate, while *Ceratophyllum demersum* had the lowest. *Potamogeton crispus* had the widest nitrogen tolerance while *Ceratophyllum demersum* had the narrowest. *Elodea canadensis* had the widest phosphorus tolerance while *Ceratophyllum demersum* had the narrowest.【Conclusion】When TN concentration was 5－15 mg/L and TP concentration was 0.5－1.5 mg/L, *Hydrilla verticillata* and *Elodea canadensis* had high removal rates and they can be chosen as pioneer plants to improve water quality of landscape lakes supplied with reclaimed water.

Key words: submerged plant; reclaimed water; removal rate; tolerance range

对于水资源严重短缺和水污染严重的我国西部城市而言,再生水回用于城市景观环境已成为污水再生利用的首选[1],但目前我国再生水深度处理工艺普遍对氮磷的去除效果有限,加之我国《城市污水再生利用 景观娱乐用水水质》(GB/T 18921－2002)对氮磷质量浓度要求偏低(TN≤15 mg/L、NH_3-N≤5 mg/L、TP≤0.5～1.0 mg/L),与《地表水环境质量标准》(GB 3838－2002)中对Ⅴ类水体水质(TN≤2 mg/L、NH_3-N≤2 mg/L、TP≤0.2 mg/L)相比仍有较大差距。所以,以再生水补水的景观水体比天然湖泊更易发生富营养化问题。

研究表明,沉水植物在抑制藻类生长、促进营养物质沉积、稳定沉积物、降低水体营养盐含量等方面起到了重要作用[2-8]。由于沉水植物的存在,其促进了再生水景观水体中氮的降解及氧化还原分解,而磷的去除则主要通过化学沉淀及基质吸附作用[9]。在低温条件下,沉水植物对再生水中氮磷的去除效果良好,尤其是罗氏轮叶黑藻对水中磷的净化效果突出[10-12];伊乐藻和轮叶黑藻对再生水水质具有良好的改善作用,可使水体中叶绿素 a 的质量浓度维持在 20 μg/L 左右,对藻类生长具有较好的抑制作用[13-14],但有关沉水植物对再生水景观水体营养盐的降解速率及耐受极限浓度方面的研究还较少。本研究选取了 4 种沉水植物,通过模拟试验和数据的回归分析,获得 TN 和 TP 质量浓度随时间变化的动力学方程,以确定植物对营养盐去除的极限质量浓度,旨在为再生水景观水体生态治理过程中植物类型的合理选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

在野外选取伊乐藻(*Elodea canadensis*)、罗氏轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、菹草(*Potamogeton crispus*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)等 4 种沉水植物,并在试验场塑料桶(底部直径×高＝40 cm×72 cm)中培养 15 d,在培养期间向水中加入微生物抑制剂 $C_{16}H_{18}NaN_3O_4S$ (MERCK)100 mg/L 以排除微生物的影响[15]。从中挑选长度一致的健壮植株移植到 5 mm 厚的无机玻璃缸(长×宽×高＝50 cm×40 cm×50 cm)中。在每个玻璃缸底部铺设经人工碾磨后的 7 cm 厚的土壤,同时,为防止底泥悬浮,在土壤层上部铺设 2 cm 厚的细沙和 1 cm 厚的砾石(粒径 5 mm)。

1.2 试验方法

当沉水植物种植 1 周后,从 2012-07 开始进行为期 45 d 的试验。为准确地研究沉水植物对再生水中氮、磷的降解规律,试验有针对性地设置了不同质量浓度 TP 值,分别是:TP＝0.1～0.3 mg/L(西安市某以再生水作为补水的景观水体 TP 实测值)[13], TP＝0.5 mg/L(《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921－2002)中对湖泊类和水景类水体中 TP 质量浓度要求临界值),TP＝1.0 mg/L(《城市污水再生利用 景观环境用水水质》中对河道类水体中 TP 质量浓度要求临界值),TP＝1.5 mg/L(《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918－2002)中对一级 B 类水体中 TP 质量浓度要求临界值)。

同时按照对应的相关标准,分别选择 15 和 20 mg/L TN 及景观水体实测 TN 质量浓度作为 TN 的初始质量浓度。根据所确定的 TN、TP 质量浓度,试验过程中的氮磷比控制在 10∶1～50∶1。在每种沉水植物中均设置 8 个初始营养盐质量浓度(最后以实际测定值计算),每组试验设置 3 个平行样。

每隔 3 d 取样监测 1 次,TN 质量浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP 质量浓度采用钼酸铵分光光度法测定。每次取样时,以自来水

补充蒸发、蒸腾作用所损耗的水量。7 月试验温度 25.1～30.3 ℃，平均温度 27.56 ℃；8 月试验温度 19.6～29.7 ℃，平均温度 24.77 ℃。

1.3　数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对数据进行处理和绘图，采用 PASW Statistics 18 进行单因素方差分析，采用单侧 t 检验法对组间数据进行差异显著性分析及双变量相关性分析。

2　结果与分析

2.1　4 种沉水植物体系的 TN-t 曲线

利用试验获得的数据，对不同沉水植物下水体中 TN、TP 质量浓度与培养时间关系进行回归分析，可得出每种沉水植物对 TN、TP 质量浓度降解的回归方程：

$$y=ae^{-bt}(a>0,b>0)。\qquad(1)$$

式中：y 为水体中的 TN 或 TP 质量浓度，mg/L；t 为培养时间，d；a、b 为反映各植物净化能力的系数，其中 b 值的大小反映各植物物种去除氮、磷能力的差异，b 值越大，植物去除氮、磷能力越强[16]。

根据试验所得数据，利用公式(1)分别对罗氏轮叶黑藻、伊乐藻、菹草、金鱼藻等 4 种沉水植物体系中 TN 质量浓度与培养时间(t)关系进行回归分析，可得到 4 种沉水植物的 TN-t 回归方程式。再分别对 4 种沉水植物体系 TN-t 回归方程中的系数 a 和 b 与 TN 初始质量浓度关系进行回归分析，可得到系数 a、b 与 TN 初始质量浓度之间的相关性分布曲线(图 1～4)。由图 1～4 可见，4 种植物体系中的 a 均随 TN 初始质量浓度的增大而呈线性增加，而 b 随 TN 初始质量浓度的增加而呈二次多项式(抛物线函数)分布。

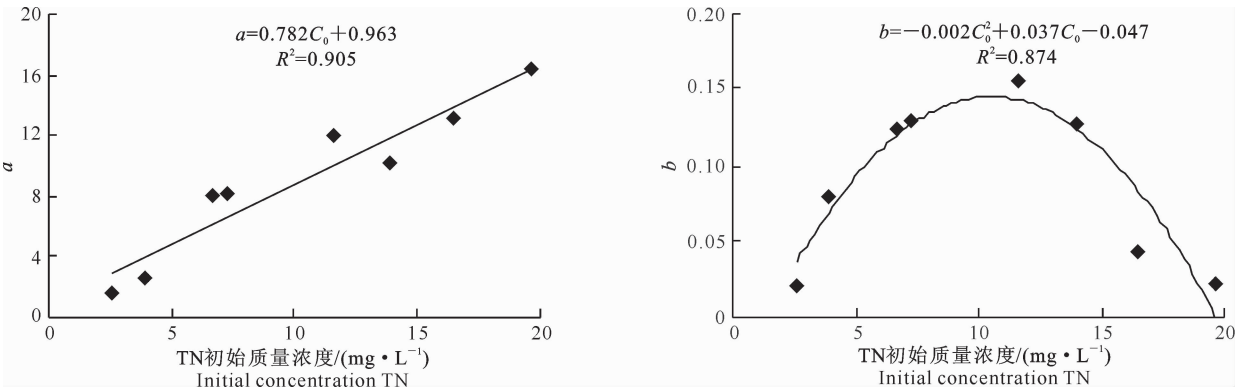

图 1　罗氏轮叶黑藻植物体系中 TN-t 回归方程系数 a、b 值与 TN 初始质量浓度(C_0)的相关性

Fig. 1　Correlation of TN-t regression equation coefficients a or b and TN initial concentration (C_0) for *Hydrilla verticillata*

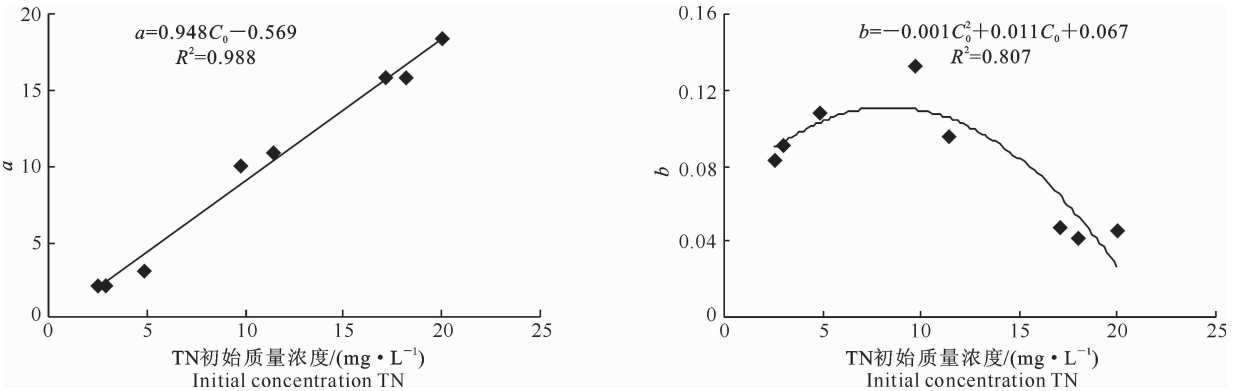

图 2　伊乐藻植物体系中 TN-t 回归方程系数 a、b 值与 TN 初始质量浓度(C_0)的相关性

Fig. 2　Correlation of TN-t regression equation coefficient a or b and TN initial concentration (C_0) for *Elodea canadensis*

由图 1～4 还可以看出，系数 a、b 值与水体 TN 初始质量浓度间均存在显著的相关性，根据公式(1)和图 1～4 中的回归式，可分别求出 4 种沉水植物体系的 TN-t 回归方程表达式(表 1)。

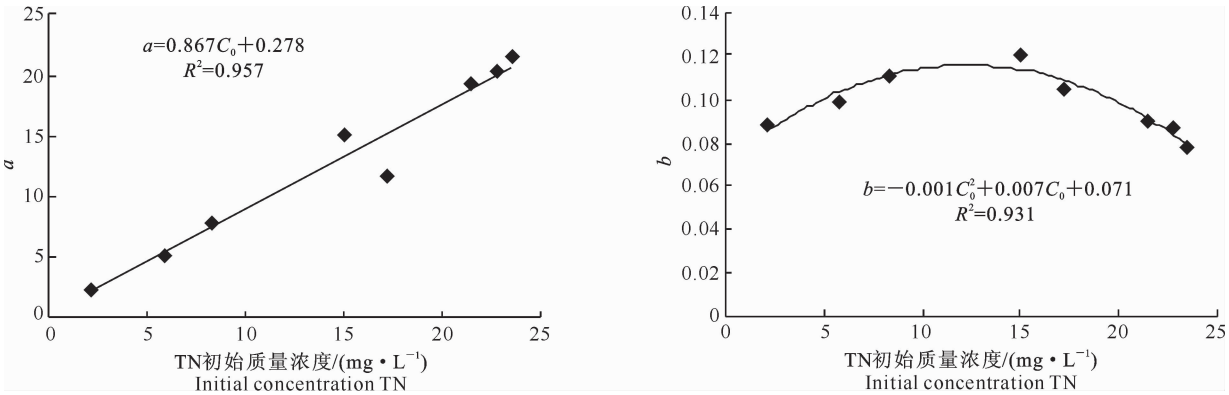

图 3 菹草植物体系中 TN-t 回归方程系数 a、b 值与 TN 初始质量浓度(C_0)的相关性

Fig. 3 Correlation of TN-t regression equation coefficient a or b and TN initial concentration (C_0) for *Potamogeton crispus*

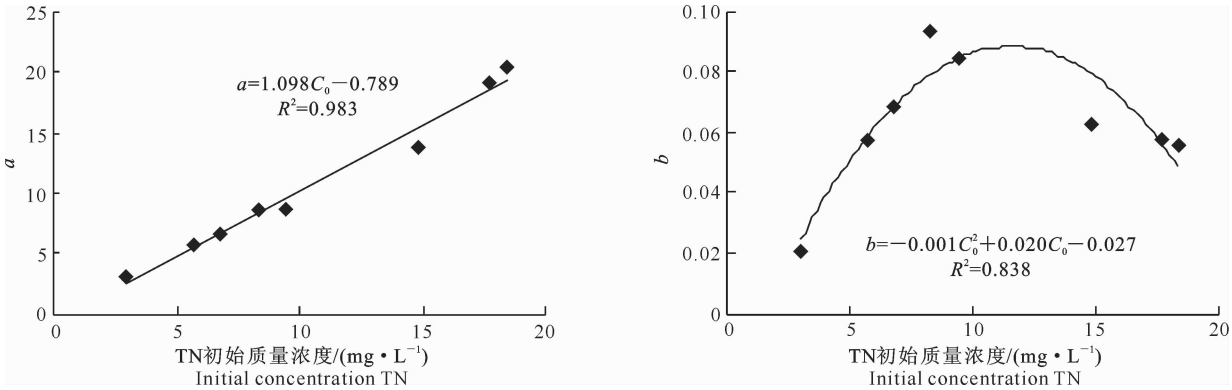

图 4 金鱼藻植物体系中 TN-t 回归方程系数 a、b 值与 TN 初始质量浓度(C_0)的相关性

Fig. 4 Correlation of TN-t regression equation coefficient a or b and TN initial concentration (C_0) for *Ceratophyllum demersum*

表 1 4 种沉水植物体系的 TN-t 回归方程表达式

Table 1 TN-t regression equations of 4 submerged plants

植物种类 Plant	TN-t 回归方程 TN-t regression equation	方程序号 Equation number
罗氏轮叶黑藻 *Hydrilla verticillata*	$y=(0.782C_0+0.963)e^{(0.002C_0^2-0.037C_0+0.047)t}$	(2)
伊乐藻 *Elodea canadensis*	$y=(0.948C_0-0.569)e^{(0.001C_0^2-0.011C_0-0.067)t}$	(3)
菹草 *Potamogeton crispus*	$y=(0.867C_0+0.278)e^{(0.001C_0^2-0.007C_0-0.071)t}$	(4)
金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*	$y=(1.098C_0-0.789)e^{(0.001C_0^2-0.020C_0+0.027)t}$	(5)

注:y 为水体中 TN 质量浓度,C_0 为水体中 TN 初始质量浓度,t 为培养时间。

Note: y, C_0 and t denote total nitrogen (TN), TN initial concentration of water system and time, respectively.

2.2 4 种沉水植物体系的 TP-t 曲线

同样利用公式(1)分别对 4 种沉水植物体系中的 TP 质量浓度与培养时间(t)关系进行回归分析,可得到沉水植物的 TP-t 回归方程式,再分别对回归方程式中的系数 a、b 与 TP 初始质量浓度进行回归分析,可得到系数 a、b 与 TP 初始质量浓度的相关分布曲线(图 5~8)。由图 5~8 可以看出,在 4 种沉水植物体系中,a、b 值分别与水体 TP 初始质量浓度密切相关,且 a 随 TP 初始质量浓度的增大而呈线性增加,b 随 TP 初始质量浓度的增加而呈二次多项式(抛物线函数)分布。若设 TP 初始质量浓度为 C_0',根据公式(1),可分别得出 4 种沉水植物体系的 TP-t 回归方程表达式(表 2)。

2.3 4 种沉水植物体系耐营养盐质量浓度的确定

2.3.1 耐氮素质量浓度的确定 由前述可知,在沉水植物降解水体氮素的曲线回归方程中,b 值的大小不仅反映了沉水植物对氮素去除速率的大小,同时还与沉水植物类型有关。由于 b 值与 TN 初始质量浓度呈二次多项式(抛物线函数)分布,抛物线必然存在一个极值点,可用 b_{max} 表示。b_{max} 的大小可反

映沉水植物去除水体中 TN 的最大速率，抛物线的跨度大小反映沉水植物耐 TN 质量浓度的范围。据此可确定出不同沉水植物去除水体中 TN 的最大速率和耐 TN 质量浓度的范围。

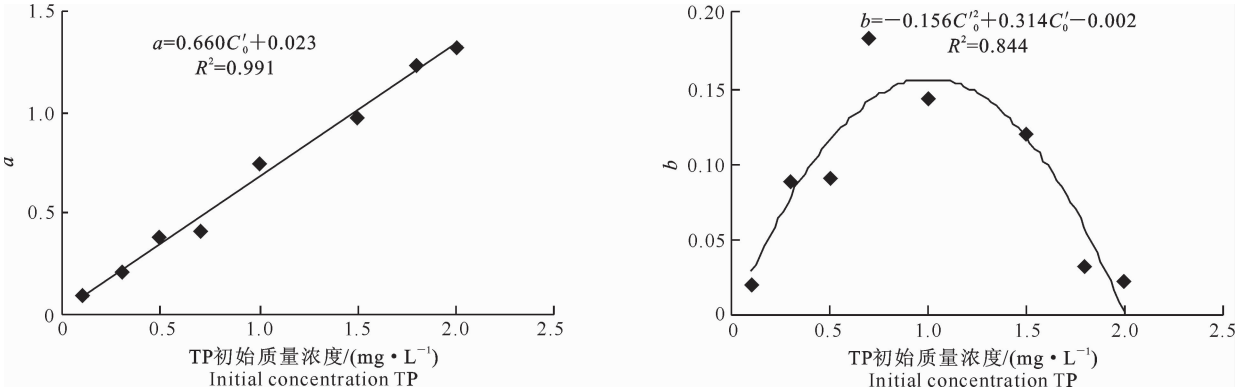

图 5　罗氏轮叶黑藻植物体系 TP-t 回归方程系数 a、b 值与 TP 初始质量浓度(C'_0)的相关性

Fig. 5　Correlation of TP-t regression equation coefficient a or b and TP initial concentration (C'_0) for *Hydrilla verticillata*

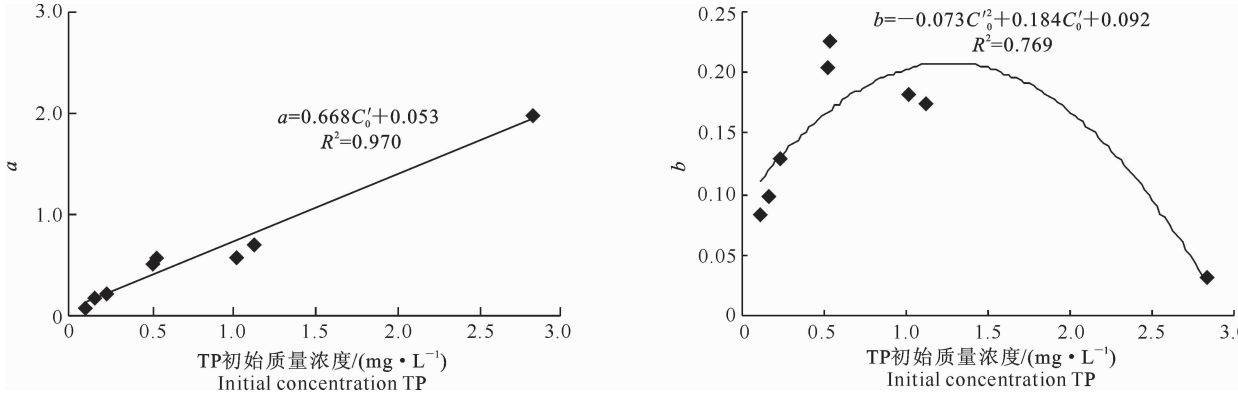

图 6　伊乐藻植物体系 TP-t 回归方程系数 a、b 值与 TP 初始质量浓度(C'_0)的相关性

Fig. 6　Correlation of TP-t regression equation coefficient a or b and TP initial concentration (C'_0) for *Elodea canadensis*

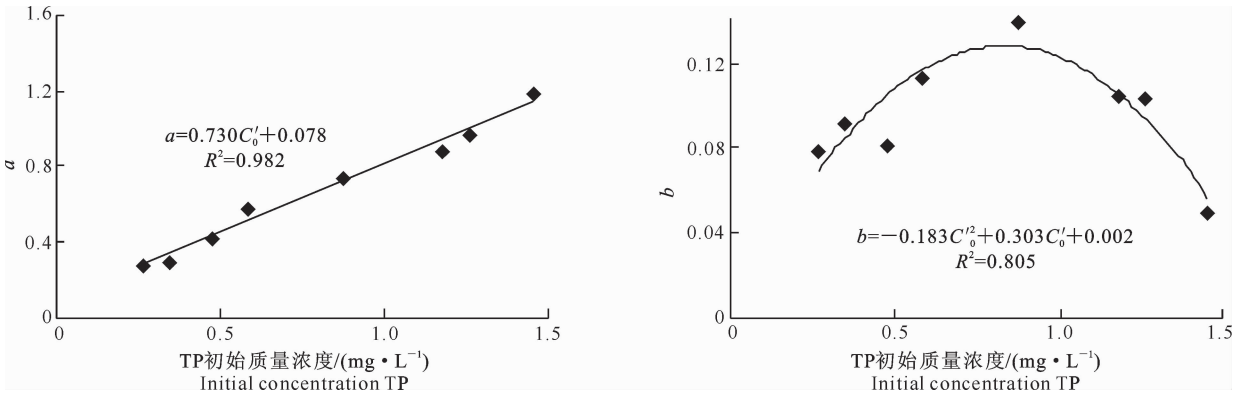

图 7　菹草植物体系 TP-t 回归方程系数 a、b 值与 TP 初始质量浓度(C'_0)的相关性

Fig. 7　Correlation of TP-t regression equation coefficient a or b and TP initial concentration (C'_0) for *Potamogeton crispus*

根据罗氏轮叶黑藻、伊乐藻、菹草和金鱼藻等 4 种沉水植物 TN-t 回归方程，采用二次多项式函数对 b 值与 TN 初始质量浓度关系做图，结果见图 9。由图 9 可知，当 TN 的初始质量浓度(C_0)达一定值时，沉水植物对 TN 存在一个最大去除速率，可用 b_{max} 表示。当 TN 的初始质量浓度(C_0)为 10.76

mg/L 时,罗氏轮叶黑藻对 TN 的去除速率最大,b_{max}为 0.150;当 C_0 为 8.75 mg/L 时,伊乐藻的去除速率最大,b_{max}为 0.113;当 C_0 为 12.00 mg/L 时,菹草的去除速率最大,b_{max}为 0.114;当 C_0 为 11.11 mg/L 时,金鱼藻的去除速率最大,b_{max}为 0.084。由此可见,罗氏轮叶黑藻对 TN 的去除速率最高,金鱼藻最低。

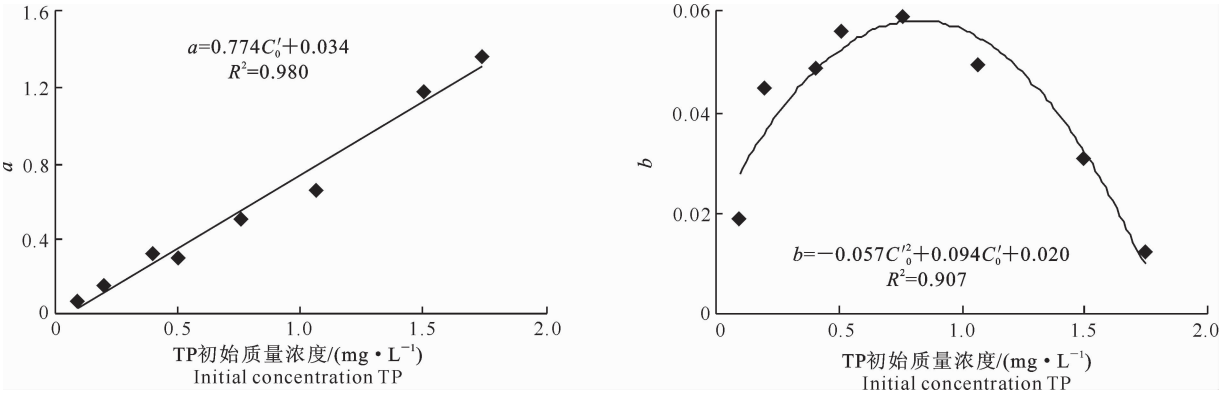

图 8 金鱼藻植物体系 TP-t 回归方程系数 a、b 值与 TP 初始质量浓度(C'_0)的相关性

Fig. 8 Correlation of TP-t regression equation coefficient a or b and TP initial concentration (C'_0) for *Ceratophyllum demersum*

表 2 4 种沉水植物体系的 TP-t 回归方程表达式

Table 2 TP-t regression equations of 4 submerged plants

植物种类 Plant kinds	TP-t 回归方程 TP-t regression equation	方程序号 Equation number
罗氏轮叶黑藻 *Hydrilla verticillata*	$y=(0.660C'_0+0.023)e^{(0.156C'^2_0-0.314C'_0+0.002)t}$	(6)
伊乐藻 *Elodea canadensis*	$y=(0.668C'_0+0.053)e^{(0.073C'^2_0-0.184C'_0-0.092)t}$	(7)
菹草 *Potamogeton crispus*	$y=(0.730C'_0+0.078)e^{(0.183C'^2_0-0.303C'_0-0.002)t}$	(8)
金鱼藻 *Ceratophyllum demersum*	$y=(0.774C'_0-0.034)e^{(0.057C'^2_0-0.094C'_0-0.020)t}$	(9)

注:y 为水体中 TP 质量浓度,C'_0 为水体中 TP 初始质量浓度,t 为培养时间。

Note: y, C'_0 and t denote total phosphorus (TP), TP initial concentration of water system and time, respectively.

由图 9 还可知,随着 TN 初始质量浓度的增加,b 值呈先升高后降低的趋势,其中当水体中 TN 质量浓度为 5～17 mg/L 时,罗氏轮叶黑藻的 b 值总体高于其他沉水植物,表明罗氏轮叶黑藻对 TN 初始质量浓度为 5～17 mg/L 的中等浓度富营养化水体具有较好的净化效果,且降解速率较高;在 TN 初始质量浓度为 0～25 mg/L 的水体中,菹草对 TN 均具有较高的去除速率,表明其对 TN 的耐受范围较宽;当 TN 初始质量浓度为 0～8.75 mg/L 时,伊乐藻对 TN 的降解速率较快,但当 TN 初始质量浓度超过 8.75 mg/L 时,伊乐藻对 TN 的降解速率迅速降低;金鱼藻对 TN 的降解能力与其他植物相比最差,但对一定范围质量浓度的 TN 有耐受能力。从对 TN 的耐受范围来看,菹草耐 TN 质量浓度的范围最宽,金鱼藻最窄。

2.3.2 *耐磷素质量浓度的确定* 根据罗氏轮叶黑藻、伊乐藻、菹草和金鱼藻等 4 种沉水植物 TP-t 回归方程,采用二次多项式函数对 b 值与 TP 初始质量浓度关系做图,结果见图 10。

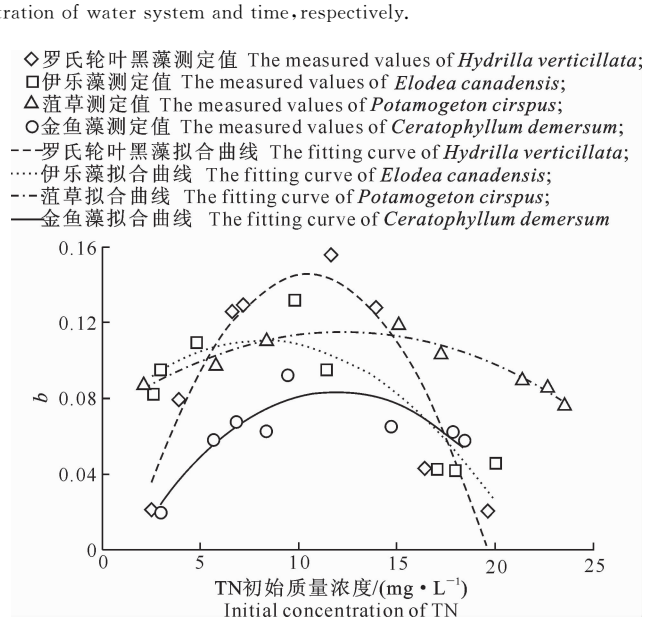

图 9 4 种沉水植物净化系数 b 值与水体中 TN 初始质量浓度的关系

Fig. 9 Correlation of regression equation coefficient b and TN initial concentrations for submerged plants

由图 10 同样可确定出不同沉水植物去除水体中 TP 的最大速率(b'_{max})和耐 TP 质量浓度的范围。

当水体中 TP 初始质量浓度(C'_0)为 1.007 mg/L 时，罗氏轮叶黑藻对 TP 的去除速率最大，b'_{max} 为 0.156；当 C'_0 为 1.256 mg/L 时，伊乐藻对 TP 的去除速率最大，b'_{max} 为 0.208；当 C'_0 为 0.830 mg/L 时，菹草对 TP 的去除速率最大，b'_{max} 为 0.128；当 C'_0 为 0.820 mg/L 时，金鱼藻对 TP 的去除最大，b'_{max} 为 0.058(图 10)。

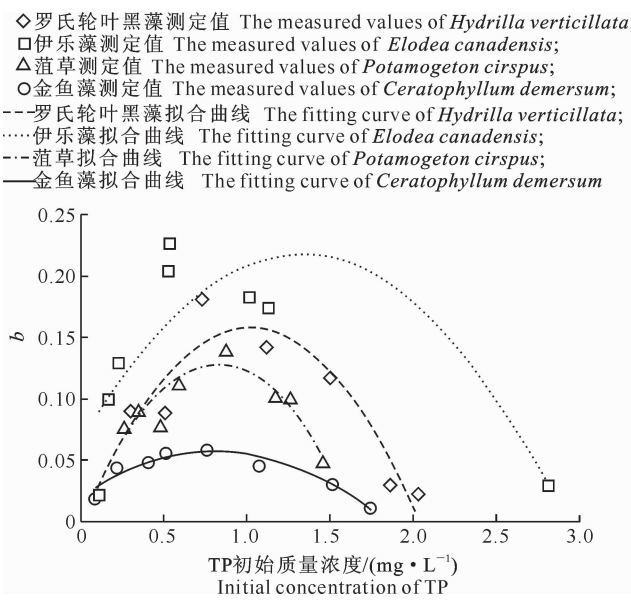

图 10　4 种沉水植物净化系数 b 值与水体中 TP 初始质量浓度的关系

Fig. 10　Correlation of regression equation coefficient b and TP initial concentrations for 4 submerged plants

由图 10 可知，4 种沉水植物对 TP 的去除速率由高至低依次为伊乐藻＞罗氏轮叶黑藻＞菹草＞金鱼藻。从沉水植物耐 TP 质量浓度的范围来看，伊乐藻耐 TP 质量浓度的范围最宽，金鱼藻较窄。综上所述，4 种沉水植物中，除金鱼藻去除能力较弱外，其余 3 种沉水植物对氮磷营养盐均具有较好的去除能力。当水体中 TN 初始质量浓度为 5～15 mg/L、TP 初始质量浓度为 0.5～1.5 mg/L 时，罗氏轮叶黑藻和伊乐藻对氮磷营养盐的去除速率相对较高，可作为以再生水为补水的景观水体先锋植物。

3　结　论

1)在有罗氏轮叶黑藻、伊乐藻、菹草、金鱼藻等 4 种沉水植物的再生水体中，TN 和 TP 初始质量浓度(y)随培养时间(t)的延长呈负指数衰减变化，变化规律符合动力学方程 $y=ae^{-bt}$ 的表达形式，其中 a、b 为反映植物净化能力的系数。

2)沉水植物体系的 TN-t 和 TP-t 回归方程中的净化系数 a 和 b 值不仅与沉水植物种类有关，而且与 TN、TP 初始质量浓度相关。a 值随 TN、TP 初始质量浓度的增大而呈线性增加，而 b 值随 TN、TP 初始质量浓度的增大而呈二次多项式(抛物线函数)分布。

3)根据沉水植物体系的 b 值与 TN、TP 初始质量浓度绘制的抛物曲线，确定了沉水植物去除水体中 TN、TP 的最大速率以及对 TN、TP 质量浓度的耐受范围，结果表明，罗氏轮叶黑藻对 TN 的去除速率最高，金鱼藻最低；菹草在高、中、低浓度富营养化水体中对 TN 均具有较快的去除速率，对 TN 的耐受范围较宽，金鱼藻藻较窄。伊乐藻对 TP 质量浓度的降解速率最大，金鱼藻最小；伊乐藻对 TP 质量浓度的耐受范围最宽，金鱼藻较窄。当水体中 TN 质量浓度为 5～15 mg/L、TP 质量浓度为 0.5～1.5 mg/L 时，罗氏轮叶黑藻和伊乐藻对氮磷营养盐的去除速率均相对较高。

[参考文献]

[1] 郑兴灿.《城市污水再生利用技术政策》要点解读 [J]. 建设科技：建设部，2006(13)：48-49.
Zheng X C.《Urban recycling technology policy》points interpretation [J]. Construction Science and Technology：Ministry of Construction，2006(13)：48-49. (in Chinese)

[2] 汪　丽，王国祥，唐晓燕，等. 不同类型水生植物群落对蓝绿藻类的抑制作用 [J]. 生态学杂志，2009，28(12)：2567-2573.
Wang L，Wang G X，Tang X Y，et al. Inhibitory effects of different types aquatic macrophyte communities on blue-green algae [J]. Chinese Joumal of Ecology，2009，28(12)：2567-2573. (in Chinese)

[3] Jin X C，Wang S R，Pang Y，et al. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments [J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical Engineering Aspects，2005，254 9(1/2/3)：241-248.

[4] Beklioglu M，Moss B. Existence of a macrophyte-dominated clear water state over a very wide range of nutrient concentrations in a small shallow lake [J]. Hydrobiologia，1996，337(1)：93-106.

[5] Zhang Z，Wu Z B，He L. The accumulation of alkylphenols in submersed plants in spring in urban lake，China [J]. Chemosphere，2008，73(5)：859-863.

[6] 王卫红，季　民. 滨海再生水河道中沉水植物的恢复对水质的改善 [J]. 农业环境科学学报，2007，26(6)：2292-2298.
Wang W H，Ji M. The restoration of rubmerged macrophytes for improving water quality in a reclaimed wastewater river in Tianjin Binhai New Area，China [J]. Journal of Agro-Environment Science，2007，26(6)：2292-2298. (in Chinese)

[7] 鲜殷鸣，陈海东，邹惠仙，等. 四种沉水植物的克藻效应 [J]. 湖泊科学，2005，17(1)：75-80.
Xian Y M，Chen H D，Zou H X，et al. Allelopathic effects of

four submerged macrophytes on *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Lake Sciences,2005,17(1):75-80. (in Chinese)

[8] 高镜清,熊治廷,张维昊,等. 常见沉水植物对东湖重度富营养化水体磷的去除效果 [J]. 长江流域资源与环境,2007,16(6):796-800.
Gao J Q,Xiong Z T,Zhang W H,et al. Removal efficiency of phosphorus in hypertrophic lake Donghu water by common submerged macrophytes [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,16(6):796-800. (in Chinese)

[9] 赵安娜,冯慕华,郭 萧,等. 沉水植物氧化塘对污水厂尾水深度净化效果与机制的小试研究 [J]. 湖泊科学,2010,22(4):538-544.
Zhao A N,Feng M H,Guo X,et al. Experimental study on tail water purification of wastewater plant with submerged macrophyte oxidation ponds [J]. Journa of Lake Sciences,2010,22(4):538-544. (in Chinese)

[10] 胡彦春,魏 铮,洪剑明. 低温下几种沉水植物对生活污水深度处理效果的研究 [J]. 安徽农业科学,2008,36(4):1573-1575.
Hu Y C,Wei Z,Hong J M. Research on the deep treatment effect of several submerged plants on domestic sewage under low temperature [J]. Journal of Anhui Agri,2008,36(4):1573-1575. (in Chinese)

[11] 王 飞,蔡秋童. 轮叶黑藻浸提液对蓝藻水华的抑制作用 [J]. 生物学通报,2011,46(7): 55-56.
Wang F,Cai Q T. Inhibition effect of extract solution from *Hydrilla verticillata* (Linn. f.) on cyanobacterial blooms [J]. Bulletin of Biology,2011,46(7):55-56. (in Chinese)

[12] 刘玉超. 沉水植物对水体中磷营养的吸收机制研究 [J]. 安徽农业科学,2011,39(2):642-643.
Liu Y C. Research on theabsorption mechanism of submerged macrophytes to phosphorous nutrientsin water body [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2011,39(2):642-643. (in Chinese)

[13] 徐志嫱,刘 维,赵 洁,等. 沉水植物对再生水景观水体水质变化的影响和净化效果 [J]. 水土保持学报,2012,26(2):214-219.
Xu Z Q,Liu W,Zhao J,et al. Purification and influence of submerged plants on water quality of landscape water body supplied by reclaimed water [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2012,26(2):214-219. (in Chinese)

[14] 张 卫,林匡飞,李 辉,等. 伊乐藻对污染水体中氮、磷的净化效果及其克藻效应 [J]. 农业环境科学学报,2011,30(3):554-558.
Zhang W,Lin K F,Li H,et al. The purification effect of nitrogen and phosphorus and allelopathic effect on polluted water by *Elodea Nuttallii* [J]. Journal of Agro-Envimnment Science,2011,30(3):554-558. (in Chinese)

[15] 常会庆,李 娜,徐晓峰. 三种水生植物对不同形态氮素吸收动力学研究 [J]. 生态环境,2008,17(2):511-514.
Chang H Q,Li N,Xu X F. NH_4^+ and NO_3^- uptake kinetics of three aquatic macrophytes [J]. Ecology and Environment,2008,17(2):511-514. (in Chinese)

[16] 乔建荣,陈艳卿. 常见沉水植物对草海水体总磷去除速率的研究 [J]. 北京大学学报:自然科学版,1996,32(6):785-789.
Qiao J R,Chen Y Q. Study on the removal rateto TP in lake Caohai by common submerged macrophytes [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,1996,32(6):785-789. (in Chinese)