

透明度胁迫对菹草 (*Potamogeton crispus*) 生长的定量影响及其生长动力学模型

丁 玲^{1,3,*}, 李 巍¹, 施 蓓¹, 李 强^{2,4}, 逢 勇³, 王国祥⁴, 郑磊夫¹

(1. 上海勘测设计研究院, 上海 200434; 3. 重庆文理学院, 重庆 402160; 3 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098;

4. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046)

摘要: 在实验室研究了不同水体透明度对沉水植物菹草生长的影响, 结果表明, 在实验条件下, 当水体透明度低于 12cm 时, 菹草由于水下光照不足而无法存活; 透明度为 15cm 时菹草的生物量明显低于透明度为 70cm (对照)、35cm 和 20cm 3 种情况下的生物量, 表明在透明度为 15cm 时, 菹草的生长受到了明显的抑制。实验期间, 菹草生物量变化的回归分析表明, 不同透明度下菹草的生长均符合逻辑斯谛曲线。采用逻辑斯谛方程描述菹草的生长规律, 结合实验结果, 确定不同水体透明度下菹草的生长参数, 结果显示: 水体透明度对菹草生长的内禀增长率 r_m 影响较大, 而对菹草生长的环境容纳量 k 无明显影响。综合考虑水体透明度对菹草生长的影响, 建立考虑水深和透明度因素的菹草生长动力学模型, 该模型可预测出在外部水环境因素作用下菹草的动态生长过程。

关键词: 透明度; 菹草; 逻辑斯谛曲线; 生长参数; 生长动力学模型

文章编号: 1000-0933(2009)01-0092-05 中图分类号: Q141, Q948, X173 文献标识码: A

Effects of water transparency on *Potamogeton crispus* growth and its dynamic model

DING Ling^{1,3,*}, LI Wei¹, SHI Bei¹, LI Qiang^{2,4}, PANG Yong³, WANG Guo-Xiang⁴, ZHENG Lei-Fu¹

1 Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China

2 Chongqing University of Arts and Sciences, 402160, China

3 Institute of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

4 College of Geography Science, Nanjing Normal University, 210046, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0092 ~ 0096.

Abstract: The experiments of *Potamogeton crispus* growth under different water transparencies were conducted in lab condition. The results showed that this submerged plant cannot be survived on low water transparency when Secchi depth was less than 12cm. The growth of *Potamogeton crispus* was significantly inhibited under the transparency of 15cm, compared to those under the transparencies of 20cm, 35cm, and 70cm (comparison group) on biomass basis. The regression analysis confirmed that the plant's growth patterns all fit a logistic curve. The logistic model was then applied to describe the growth regularity, estimating growth parameters under different water transparencies. The simulation indicated that the water transparency has significant effect on intrinsic rate of natural increase r_m , while less effect on environmental capacity k . Based on the above results, the dynamic growth model with parameters of water depth and transparency was finally developed to predict the dynamic process of *Potamogeton crispus* growth under the external factors.

Key Words: water transparency; *potamogeton crispus*; logistic curve; growth parameter; dynamic growth model

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2003AA06002)

收稿日期: 2007-05-31; 修订日期: 2008-10-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dingling_hohai@163.com

影响沉水植物生长的环境因子包括光照、水温、底质条件、营养水平等。我国一些学者在环境因子影响沉水植物生长恢复方面做了许多研究工作^[1~9],研究表明,光照对水生高等植物的存活率和生长有重要影响,湖泊较低的透明度是制约沉水植被恢复的关键因子。我国长江中下游的一些湖泊,湖盆浅平但连通长江,大量泥沙进入湖泊导致水体透明度低,光照弱,沉水植物稀少,水生生态系统单一。然而,在混浊的泥沙型水体中沉水植物生长发育方面的研究却鲜有报导。因此,研究由泥沙引起的浑浊水体对沉水植物的影响,对维护健康的水生态系统有一定的指导作用。本文通过在实验室研究耐寒型沉水植物菹草在泥沙型浑浊水体不同透明度下的生长情况,探讨水体透明度对菹草生长的定量响应关系,并在此基础上建立了菹草生长的动力学模型,应用该模型可预测出菹草在水体中的分布及生长情况。论文研究旨在探索泥沙型浑浊水体透明度对沉水植物生长发育的影响,为这类浑浊水体中恢复、重建沉水植被提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 植物引种

实验所用的菹草石芽为从南京师范大学月亮湾湖区(33°36.9'N 120°28.5'E)采集得到的当年石芽,大小相似,芽长约(2.5 ± 0.3) cm。将菹草石芽种植于小盆中,每盆 10 个,盆高 8 cm,直径 15 cm,装满泥土,土中 TN、TP(以 P₂O₅ 表示)分别为 0.194、0.514 mg/g, Cu、Zn、Pb、Cr 和 Cd 分别为 22.062、55.917、12.034、34.892 μg/g 和 2.808 μg/g。小盆置于实验桶(Ø 0.52 m × 0.7 m)底。

1.2 泥沙型浑浊水体制备

实验泥沙采自长江镇江段(32°23.2'N, 119°45.1'E),用孔径 100 μm 筛网水洗过滤掉 100 μm 以上的泥沙,滤液静置 2 h 后,选上层悬浮液作为实验用的泥沙型浑浊水体。配置 10 ~ 200 NTU(浊度单位)的泥沙溶液(每 10 NTU 为一个梯度),用美国 HACH 公司的 2100P 型浊度仪测定水体浊度;随后,采用烘干法测定悬浮泥沙含量,与水体浊度进行回归分析,得到回归方程: $Y = -0.0017x^2 + 1.8305x$ ($R^2 = 0.982, n = 20$)。根据定时监测的水体浊度计算悬浮泥沙含量,也依据浊度调配悬浮泥沙的浓度。

1.3 实验方法

实验时间为 2005 年 10 月底至 2006 年 3 月中旬。实验地点为南京师范大学仙林校区的江苏省生态修复中试平台。采用真空泵将空气泵入制备的泥沙溶液中,使其泥沙含量均匀。然后,将混合均匀的泥沙溶液用导管从上方加入各桶,使各桶水体浊度分别约为 30、60、90、120、150 NTU 和 180 NTU,以不含泥沙的水体为对照,3 组重复。实验期间水体浊度的误差范围为 ± 5 NTU;调节各管水流,保持各桶的水体浊度,以不含泥沙的水体为对照。晴天正午用萨氏盘测定水体的透明度,30、60、90、120、150 NTU 和 180 NTU 水体的透明度分别为 35、20、15、12、10 cm 和 8 cm。采用上海嘉定学联仪表厂的 ZDS210 型照度计测定水面光照强度。

实验于自然温度、光照条件下进行,分别于第 10、20、30、40、60、90 天和 120 天随机统计菹草各实验水体中的植株鲜重,各浊度随机选择 3 株进行测定,取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 透明度对菹草存活的影响

菹草石芽在对照水体和浑浊泥沙水体中均能萌发。这与 2005 年李强等^[10]的研究结果相同。

沉水植物植株沉水生长,若底层光照不足,沉水植物的光合作用将受阻而导致不能存活。为分析透明度对菹草存活率的影响,在整个实验期间,观察各实验水体中菹草的存活情况。发现在清水对照和透明度为 35、20、15 cm 泥沙水体中,菹草在 4.5 个月的实验期间均能生长和存活。而在透明度分别为 12、10 cm 和 8 cm 的泥沙水体中,在实验第 40 天时菹草出现了不同程度的死亡现象;在实验第 120 天时,菹草的存活率分别仅为 50%、50% 和 30%,至 3 月中旬实验结束时,这 3 种泥沙含量水体中的菹草全部死亡。可见,在本实验条件下,当水体透明度 ≤ 12 cm 时,由于水下光照不足导致菹草发育受阻,最终无法存活。

2.2 透明度对菹草生物量的影响

图 1 为实验期间各水体中菹草单株生物量的变化情况。从图中可以看出,实验期间对照水体和透明度为

35、20cm 的泥沙水体中菹草生长情况良好,4 个月后,单株生物量达到了 3~5g/株左右;在透明度为 15cm 的泥沙水体中,实验 30d 时,菹草的单株生物量仅为对照水体以及透明度为 35、20cm 泥沙水体中的一半左右,表明菹草植株的生长由于水下光照条件的限制而受到了明显的抑制,但此后菹草生物量仍能保持一定的增长;而在透明度为 12、10cm 和 8cm 的 3 种泥沙含量水体中,实验 30d 后,菹草植株的生长受到了明显的抑制,随着时间的延长,菹草的单株生物量增加缓慢;尤其在透明度为 8cm 的泥沙水体中,菹草的单株生物量在实验 90d 后出现了明显的下降,植株地上部分出现腐烂现象,实验第 120 天时菹草单株生物量降至 0.1g/株。可见,水体透明度对菹草生长的影响很大,在透明度低的水体中,水下光强的急剧衰减使得菹草的光合作用受到严重阻碍,从而抑制了植株的生长,导致植株器官功能衰减,甚至丧失。

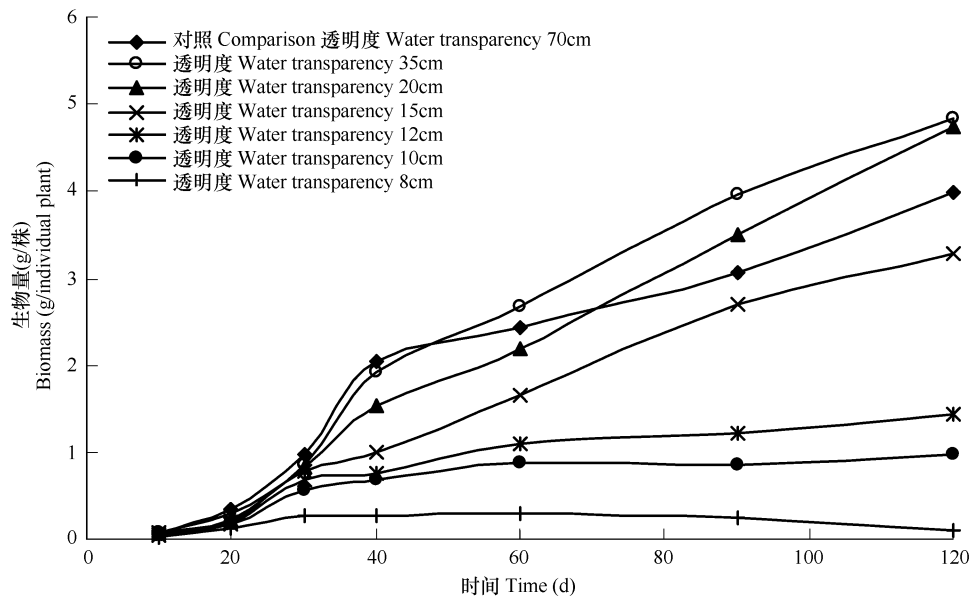


图 1 透明度对菹草生长的影响

Fig. 1 Effects of water transparency on *Potamogeton crispus* growth

值得注意的是,透明度 35cm 和 20cm 两桶中菹草的单株生物量分别在一定实验时间之后高出对照组,以透明度 35cm 桶中最高,120d 后,单株生物量达到了 4.82g/株。这与王文林等^[11]2005 年的实验结果相似。李强^①基于本实验研究了不同透明度下菹草的形态特征及光合作用特性,其研究成果已对上述实验现象做出了合理的解释,即:生物量的差异主要与不同透明度水体下菹草株高、叶片数和叶宽发生的差异有关,根本原因是不同水体中光照强度的不同导致植株光合作用能力的差异。

2.3 不同透明度下菹草的生长规律

在保证菹草存活的前提下,分析不同透明度下菹草的生长规律。从图 1 可以看出,在对照水体和透明度分别为 35、20cm、15cm 的泥沙水体中,菹草的单株生物量均表现出前 40d 呈指数增长,此后增长速率减缓的规律。

对水体中菹草生物量的变化过程进行回归分析,发现生物量变化均符合逻辑斯谛曲线,回归方程见表 1。

3 菹草生长动力学模型

目前描述植物种群在有限环境条件下连续增长的一种最普遍的形式是逻辑斯谛增长,公式为:

$$f = \frac{k}{1 + e^{a - r_m t}} \quad (1)$$

式中, f 为植物种群的大小,一般用生物量来表示; r_m 为植物的内禀增长率,是在最适条件下种群内部潜

① 详见李强博士论文“环境因子对沉水植物生长发育的影响机制”第四章。

在的增长率; k 为环境容纳量,即环境条件所能允许容纳的种群最大数量; t 为生长时间; a 为与初始条件有关的常数。本文采用式(1)来描述菹草的生长过程,其中 f 定义为菹草的单株生物量(g/株); k 定义为环境条件所能允许的菹草最大单株生物量(g/株)。将(1)式略作变化后可写为:

$$f = 1 / (1/k + (e^a/k) \cdot e^{-rt}) \quad (2)$$

将(2)式和表1中不同透明度下菹草生物量增长的回归方程做比较,即可得到不同透明度下菹草的生长参数,具体见表2。

表1 菹草生物量增长的回归方程

Table 1 Regression equation of *Potamogeton crispus* biomass increase

种类 Species	透明度 Water transparency (cm)	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
菹草 <i>Potamogeton crispus</i>	70(对照) 70(Comparison)	$Y = 1 / (1/5.188 + 4.802 \times 0.949^t)$	0.906
	35	$Y = 1 / (1/5.236 + 7.582 \times 0.937^t)$	0.949
	20	$Y = 1 / (1/5.218 + 9.432 \times 0.939^t)$	0.951
	15	$Y = 1 / (1/5.164 + 7.955 \times 0.952^t)$	0.919

表2 不同透明度下菹草的生长参数

Table 2 *Potamogeton crispus* growth parameter on different water transparency

种类 Species	透明度 Sater transparency (cm)	内禀增长率 r_m Intrinsic rate of natural increase r_m	环境容纳量 k (g/株) Environmental capacity k (g/individual plant)
菹草 <i>Potamogeton crispus</i>	70(对照) 70(Comparison)	0.052	5.188
	35	0.065	5.236
	20	0.063	5.218
	15	0.049	5.164

从表2可以看出,不同透明度情况下,菹草单株生物量的环境容纳量值变化不大,因此可将 k 值看作是一个不受透明度影响的常数,而透明度对于菹草生长的内禀增长率影响则较大。水下光照条件是影响沉水植物生长的重要因素之一,透明度和水深的综合作用影响沉水植物的光合作用。因此,以水深和透明度的比值为影响因子,对菹草生长的内禀增长率作趋势分析,得出水深和透明度比值与内禀增长率的定量关系如下:

$$y = 0.0005(h/SD)^3 - 0.0107(h/SD)^2 + 0.041(h/SD) + 0.0215$$

将该定量关系代入式(1),得到菹草生长的动态方程为:

$$f = \frac{5.202}{1 + e^{a - (0.0005(h/SD)^3 - 0.0107(h/SD)^2 + 0.041(h/SD) + 0.0215) \cdot t}} \quad (3)$$

式中, h 为水深(cm), SD 为水体透明度(cm)。天然水体的水深受降雨、蒸发、出入流、风、潮汐等因素的影响而不断变化,水体透明度则随着水中悬浮颗粒、浮游植物、可溶性有机物等物质的输运变化而发生动态变化。因此,可考虑应用水动力模型和透明度模型来计算水深和透明度,将水动力模型、透明度模型和式(3)进行实时耦合,即可模拟出在外部水环境因素作用下的菹草动态生长过程。

4 结论

(1)在本实验条件下,当水体透明度 ≤ 12 cm时,菹草由于水下光照不足而无法存活;透明度为15cm时,菹草的生长受到了明显的抑制;透明度为20、35cm时,菹草长势最好,生物量高于清水对照。

(2)不同透明度条件下菹草的生长规律均符合逻辑斯谛曲线。采用逻辑斯谛方程描述菹草的生长规律,结果表明:水体透明度对菹草生长的内禀增长率影响较大,而对菹草生长的环境容纳量无明显影响。

(3)确定了水深和透明度比值与菹草内禀增长率的定量关系,并将该关系式代入逻辑斯谛方程,建立了考虑水深和透明度因素的菹草生长动力学模型,该模型可预测菹草的动态生长过程。

References:

- [1] Yan C Z, Zeng A Y, Jin X C, *et al.* Physiological effects of ammonia-nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (3): 1050 — 1055.
- [2] Ji W D, Shi G X, Zhang H, *et al.* Physiological and ultrastructural responses of *Potamogeton crispus* to Hg^{2+} stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (7): 2856 — 2863.
- [3] Zhang S Z, Wang G X, Pu P M. The influence of algae-type eutrophication on aquatic higher plants and hydrophytic vegetational reconstruction in Taihu Lake. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1998, 7(4): 52 — 57.
- [4] Li W C, Lian G H. Light Demand for brood-bud germination of submerged plant. *Journal of Lake Sciences*, 1996, S1: 25 — 29.
- [5] Qiu D R, Wu Z B. Ecological studies on aquatic macrophytes in lake Donghu of Wuhan — III. Feasibility for rehabilitation of submerged macrophytes in the lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1998, 7(1): 42 — 48.
- [6] Reddy K R, DeBusk T A. State-of-the-art utilization of aquatic plant in water pollution control. *Water Science & Technology*, 1987, 19(10): 61 — 79.
- [7] Gumbrecht T. Nutrient removal processes in freshwater submersed macrophyte systems. *Ecological Engineering*, 1993, (2): 1 — 30.
- [8] Bishop P L, Eighmy T T. Aquatic wastewater treatment using *Elodea nuttalli*. *Journal of Water Pollution Control*, 1989, (61): 641 — 648.
- [9] Brix H, Schierup H H. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control. *Ambio*, 1989, (18): 100 — 107.
- [10] Li Q, Wang G X, Pan G Q, *et al.* Influence of water turbidity on germination of *Potamogeton crispus* and growth of germinated seedling. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3594 — 3601.
- [11] Wang W L, Wang G X, Li Q, *et al.* Influence of water turbidity on growth of the seedlings of *Potamogeton crispus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3587 — 3593.

参考文献:

- [1] 颜昌宙, 曾阿妍, 金相灿, 等. 不同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响. *生态学报*, 2007, 27(3): 1050 ~ 1055.
- [2] 计汪栋, 施国新, 张慧, 等. 菹草对 Hg^{2+} 胁迫的生理和结构应答反应. *生态学报*, 2007, 27(7): 2856 ~ 2863.
- [3] 张圣照, 王国祥, 濮培民. 太湖藻型富营养化水对水生高等植物的影响及植被的恢复. *植物资源与环境*, 1998, 7(4): 52 ~ 57.
- [4] 李文朝, 连光华. 几种沉水植物营养繁殖体萌发的光需求研究. *湖泊科学*, 1996, S1: 25 ~ 29.
- [5] 邱东茹, 吴振斌. 武汉东湖水生植物生态学研究——III. 沉水植被重建的可行性研究. *长江流域资源与环境*, 1998, 7(1): 42 ~ 48.
- [10] 李强, 王国祥, 潘国权, 等. 水体浊度对菹草萌发及萌发苗光合荧光特性的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3594 ~ 3601.
- [11] 王文林, 王国祥, 李强, 等. 水体浊度对菹草(*Potamogeton crispus*)幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3587 ~ 3593.