

# 滇池不同水域凤眼莲生长特性及氮磷富集能力

张迎颖<sup>1</sup>, 张志勇<sup>1</sup>, 王亚雷<sup>1</sup>, 刘海琴<sup>1</sup>, 王 智<sup>1</sup>, 严少华<sup>1①</sup>, 韩亚平<sup>2</sup>, 杨 琏<sup>2</sup> (1. 江苏省农业科学院资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 昆明市滇池生态研究所, 云南 昆明 650228)

**摘要:** 在滇池草海和外海水域共选择 6 个试验点, 采用围栏设施有控制地种养凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*), 初始放养量为  $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 每 2 周监测 1 次各试验点水质状况、凤眼莲生长特性指标和植株氮磷含量, 对比研究滇池不同水域凤眼莲生长特性及氮磷富集能力差异。结果显示, 外草海水域水体氮磷浓度较高, 凤眼莲生物量增长速率最高, 平均为  $542 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 全年累积生物量最大, 可达  $85.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 植株 TN、TP 含量(以干质量计, 下同)最高, 分别为  $32.9$  和  $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。外海白山湾水域水体氮磷浓度相对较低, 凤眼莲生物量增长速率较低, 平均为  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 全年累积生物量较低, 为  $27.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 植株 TN、TP 含量较低, 分别为  $15.0$  和  $6.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水体 pH 值、氮磷含量和风浪是影响凤眼莲生长的主要因素。

**关键词:** 凤眼莲; 滇池; 生物量增长速率; 氮; 磷

**中图分类号:** X173      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-4831(2011)06-0073-05

**Research on the Growth Characteristics and Accumulation Ability to N and P of *Eichhornia crassipes* in Different Water Areas of Dianchi Lake.** ZHANG Ying-ying<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-yong<sup>1</sup>, WANG Ya-lei<sup>1</sup>, LIU Hai-qin<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>, YAN Shao-hua<sup>1</sup>, HAN Ya-ping<sup>2</sup>, YANG Lian<sup>2</sup> (1. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Kunming Institute of Ecology of Dianchi Lake, Kunming 650228, China)

**Abstract:** In order to study the growth characteristics and accumulation ability to N and P of water hyacinth in different water areas of Dianchi Lake, *Eichhornia crassipes* were planted by fence facilities with the initial planting amount of  $3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  in six experimental points in Caohai and Waihai of Dianchi Lake. Water quality of the experimental water area, growth characteristics of *E. crassipes* and plant total nitrogen content and total phosphorus content were monitored every two weeks. The results show that since the concentrations of N and P in Caohai water were higher than other experimental water area, the average biomass growth rate of *E. crassipes* was  $542 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  with the accumulated biomass of  $85.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  throughout the year, plant total nitrogen content of  $32.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and total phosphorus content of  $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Since the concentrations of N and P in Baishan bay of Waihai water were lower, the average biomass growth rate of *E. crassipes* was  $150 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  with the accumulated biomass of  $27.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  throughout the year, plant total nitrogen content of  $15.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and total phosphorus content of  $6.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . In brief, pH, concentrations of N and P in water and wind wave are the main factors affecting the growth of *E. crassipes*.

**Key words:** *Eichhornia crassipes*; Dianchi Lake; biomass growth rate; nitrogen; phosphorus

滇池是我国西南地区最大的高原湖泊, 面临着严峻的富营养化问题。2009 年《中国环境状况公报》显示, 滇池水质总体为劣 V 类, 草海处于重度富营养状态, 外海处于中度富营养状态, 主要污染指标为总磷(TP)和总氮(TN)。利用水生高等植物吸收水体中氮磷等污染物, 构建生态修复工程治理污染水体, 已成为水体富营养化控制的重要手段。凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 是研究最早、最深入, 也是实际生态修复工程中应用较广的水生植物<sup>[1]</sup>。

大量研究显示, 凤眼莲生长速度快, 生物产量高, 氮磷富集能力强, 对污染水体的净化能力优于其他水生植物, 被广泛应用于富营养化湖泊和河道、养

殖废水、工业废水及垃圾渗滤液等污水的处理<sup>[2-5]</sup>。2009—2010 年, 基于凤眼莲生态修复技术, 笔者所在课题组开展了“滇池凤眼莲富集氮磷与资源化利用研究与示范”项目研究, 于滇池外海白山湾水域建立  $66.67 \text{ hm}^2$  凤眼莲控制性种养基地, 以净化滇池湖湾内源污染。当前, 关于凤眼莲生长特性及富集氮磷能力的研究主要集中在小试与中试阶段, 野

收稿日期: 2011-08-19

基金项目: 国家科技支撑计划 (2009BAC63B01); 云南省社会发展专项 (2009CA034)

① 通信作者 E-mail: shyan@jaas.ac.cn

外试验报道较少。笔者在滇池不同水域构建围栏控制性种养凤眼莲,研究不同水文状况、水质条件下凤眼莲的生长特性、氮磷富集能力及其生长影响因素,以期为高效利用凤眼莲治理滇池等富营养化水体提供理论支撑和实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与地点

如图1所示,在滇池水域共选择6个试验点,其中,外草海和老干鱼塘试验点位于草海,龙门村、富善村、海口镇和白山湾试验点位于外海。采用锚基管架浮球围网设施<sup>[6]</sup>构建围栏控制性种养凤眼莲,种养围栏由15个1 m × 2 m的小隔栏(小区)组成,每个小区内均放养6 kg凤眼莲,即初始放养量为3 kg · m<sup>-2</sup>。试验期为2010年6月29日—11月2日。凤眼莲种苗来自滇池外海白山湾凤眼莲控制性种养基地。

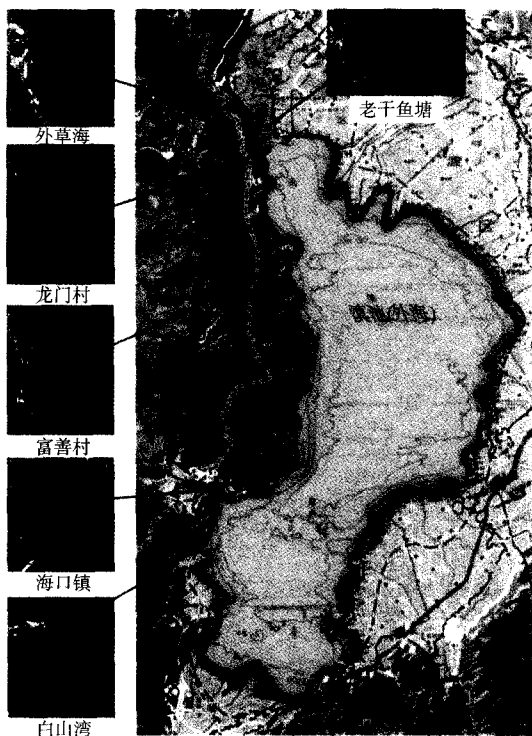


图1 滇池凤眼莲控制性种养试验水域分布示意

Fig1 Distribution map of experiment water areas where *Eichhornia crassipes* were planted in Dianchi Lake

### 1.2 试验方法

在各试验点放养凤眼莲时,预先随机选择多株凤眼莲测定初始生长特性,包括株高、根长和干物质含量。每2周测定1次各试验点的凤眼莲生长特性,每次选择3个小区进行循环监测,测定指标包括

生物累积量、株高、根长和分蘖数,并计算生物量增长速率;于各试验点采集3份凤眼莲植株样,将其分成地上部(茎叶)和地下部(根系),分别称量各部位鲜质量,杀青烘干后称量干质量,粉碎制样以测定干物质及氮磷含量;于各试验点凤眼莲种养区和对照区(对照区为距离种养围栏10 m处)采集水样,各采集3个平行样,用于监测水体TN、TP和叶绿素a(Chl-a)含量,同时记录水温、气温、pH值和溶解氧(DO)。

水质指标测定方法:DO采用JPB-607型便携式溶解氧仪测定;pH值采用PHB-10型笔式pH计测定;植物TN采用混合催化剂硫酸消化,凯氏定氮法测定;植物TP采用硫酸高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定;水体TN和TP采用AutoAnalyzer3 Applications流动分析仪测定;水体Chl-a采用 $\varphi = 90\%$ 丙酮萃取比色法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 滇池不同水域水质状况

除初始水样外,试验期间对供试水域进行了8次水样采集。由于试验在野外大水域开展,凤眼莲种养区与外围水域并未进行分隔,水体可自然流动。因此,表1只列出了各试验点水域8次采样得到的水体理化指标的均值,旨在为后续相关分析提供水体背景值。

GB 3838—2002《地表水环境质量标准》给出了湖泊V类水标准限值: $\rho$ (TN)为2.0 mg · L<sup>-1</sup>,  $\rho$ (TP)为0.2 mg · L<sup>-1</sup>。由表1可知,外草海水体pH值为7.74, TN、TP含量均高于湖泊V类水标准限值,为劣V类,污染严重,呈重度富营养化状态;老干鱼塘水域虽属草海,但与草海之间有人工堤相隔,水体之间基本无交换,水体呈碱性,水质也为劣V类。外海4处试验点水体均呈碱性,其中龙门村水域为外海蓝藻富集区,水体Chl-a含量及TN、TP含量均较高;富善村水域为滤食性鱼类养殖基地,风浪较大;海口镇为滇池西南出水口,与其他试验点相比, TN、TP含量较低,水质相对较好,为V类;白山湾为凤眼莲控制性种养基地,在滇池外海中属于水质相对较好区域。

### 2.2 滇池不同水域凤眼莲生长状况

要对比各试验点凤眼莲的生长状况,需计算其生物量增长速率(以下简称为生长速率),其计算公式为

$$R = \frac{q_{n+1} - q_n}{t} \quad (1)$$

式(1)中,  $R$  为凤眼莲生长速率,  $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ;  $q_n$  和  $q_{n+1}$  分别为第  $n$  和  $n+1$  次监测时的累积生物量,  $g \cdot m^{-2}$ ;  $t$  为第  $n$  和  $n+1$  次监测的时间间隔,  $d$ 。

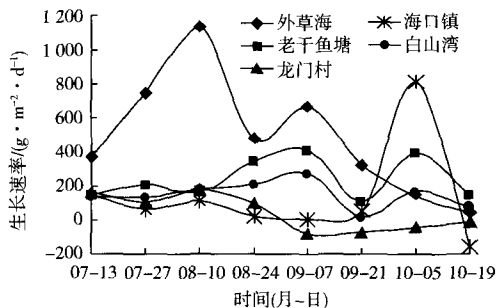
表 1 滇池不同水域凤眼莲种养区和对照区水质状况

Table 1 Water quality of planting region of *Eichhornia crassipes* and control region in different water areas of Dianchi Lake

试验水域	pH 值		$\rho(DO)/(mg \cdot L^{-1})$		$\rho(Chl-a)/(\mu g \cdot L^{-1})$		$\rho(TN)/(mg \cdot L^{-1})$		$\rho(TP)/(mg \cdot L^{-1})$	
	种养区	对照区	种养区	对照区	种养区	对照区	种养区	对照区	种养区	对照区
外草海	7.74	7.98	4.40	7.10	249.29	154.87	6.38	5.63	0.639	0.621
老干鱼塘	9.50	9.59	7.30	10.10	512.62	161.23	3.05	3.07	0.573	0.448
龙门村	9.01	9.05	5.50	6.50	8 570.81	467.38	12.24	4.28	1.159	0.282
富善村	9.53	9.59	9.50	10.10	356.51	244.36	2.56	2.34	0.172	0.140
海口镇	9.61	9.62	7.20	9.20	87.45	50.62	1.37	2.12	0.194	0.197
白山湾	8.43	9.35	3.70	8.00	151.47	97.17	2.35	2.16	0.234	0.283

数据为各试验点 8 次采样的均值。

由图 2 和表 2 可知,外草海凤眼莲生长速率最高,第 3 次采样(8 月 10 日)时已达到最高值,为  $1 132 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,第 5 次采样(9 月 7 日)时出现次高值,为  $664 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,试验后期由于围栏面积有限,单位面积内凤眼莲群体密度过大,其生长速率受到一定限制,但该试验点的凤眼莲累积生物量仍然高于其他试验点,达  $85.37 kg \cdot m^{-2}$ 。老干鱼塘凤眼莲在试验前期生长速率较低,第 3 次采样时仅为  $165 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,且叶片发黄,出现开花现象,雨季后凤眼莲生长速率升高,第 5 次采样时增至  $414 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,且叶片变绿,累积生物量逐渐增加,达  $43.20 kg \cdot m^{-2}$ 。



富善村水域凤眼莲未能存活。海口镇从第 4 次采样(8 月 24 日)起试验围栏移至外草海。

图 2 滇池不同水域凤眼莲生长速率曲线

Fig. 2 Curves of biomass growth rate of *Eichhornia crassipes* in different water areas of Dianchi Lake

在滇池外海的试验点中,龙门村水域为蓝藻富集区,受到高密度蓝藻生物竞争等因素的影响,凤眼莲生长速率较低,第 3 次采样时仅为  $174 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,试验后期由于凤眼莲植株衰老腐烂,第 5 次采样时生长速率出现负值。海口镇水域水体氮磷含量较低,由于黑色病斑凤眼莲濒临死亡,后将试验围栏移动至外草海水域,凤眼莲生长速率迅速升高,但其

生物量基数小,故累积生物量仍然远低于原外草海试验点,仅为  $18.70 kg \cdot m^{-2}$ 。白山湾水域凤眼莲分蘖较少,第 5 次采样时生长速率达到最高值,为  $275 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。而外海富善村水域风浪较大,凤眼莲植株破损严重,最终未能存活。

表 2 滇池不同水域凤眼莲生长速率

Table 2 Biomass growth rate of *Eichhornia crassipes* in different water areas of Dianchi Lake

试验水域	最大生长速率/ ( $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	平均生长速率/ ( $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	累积生物量 <sup>1)</sup> / ( $kg \cdot m^{-2}$ )
外草海	$1 132 \pm 79$	542	85.37
老干鱼塘	$417 \pm 49$	240	43.20
龙门村	$174 \pm 10$	136	24.48
海口镇	$143 \pm 9$	104	18.72
白山湾	$275 \pm 20$	150	27.00

富善村水域凤眼莲未能存活。1) 外草海累积生物量为生物量达到  $20 kg \cdot m^{-2}$  后打捞一半凤眼莲时的全年累积生物量实测值;其余各试验点累积生物量为凤眼莲平均生长速率与理论生长天数(180 d)的乘积。

### 2.3 滇池不同水域凤眼莲生长特性

由表 2~4 可知,试验期间,外草海凤眼莲平均生长速率为  $542 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,分蘖数为 284,凤眼莲植株较大,含水率较高,第 8 次采样(10 月 19 日)时株高为 85.50 cm,根长为 25.00 cm,干物质含量约为  $51.6 g \cdot kg^{-1}$ 。老干鱼塘水体 pH 值为 9.50,远高于外草海,凤眼莲平均生长速率与分蘖数均低于外草海,凤眼莲植株相对也较小,含水率略低,第 8 次采样时株高为 26.60 cm,根长为 17.70 cm,干物质含量约为  $63.5 g \cdot kg^{-1}$ 。

外海龙门村水域为蓝藻富集区,试验期间水体  $\rho(Chl-a)$  均值达  $8 570.81 \mu g \cdot L^{-1}$ ,与高密度的蓝藻相比,试验小区内凤眼莲生物量较小,难以形成优势种群与蓝藻进行生物竞争,试验过程中凤眼莲叶

片出现黑色病斑,故凤眼莲生长速率较低,平均生长速率仅为  $136 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,但其分蘖速率在外海各试验点中仍属较高,分蘖数为 99,第 8 次采样时株高为 19.00 cm,根长为 30.80 cm。外海白山湾水域水质较好,水体氮磷含量较低,凤眼莲分蘖速率最低,分蘖数仅为 52,凤眼莲的生长主要体现在株高和根长上,第 5 次采样时株高为 45.60 cm,根长为 73.70 cm,第 8 次采样时由于气温下降,凤眼莲逐渐枯萎,株高和根长指标有所降低。

表 3 滇池不同水域凤眼莲生长特性

Table 3 Growth characteristics of *Eichhornia crassipes* in different water areas of Dianchi Lake

试验水域	株高/ cm	根长/ cm	根冠比值		分蘖数	分蘖速率/ ( $\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )
			鲜质量	干质量		
外草海	85.50 ± 4.00	25.00 ± 0.50	0.30 ± 0.06	0.39 ± 0.06	284 ± 12	2.53 ± 0.12
老干鱼塘	26.60 ± 0.81	17.70 ± 0.78	0.69 ± 0.10	0.72 ± 0.17	135 ± 17	1.21 ± 0.12
龙门村	19.00 ± 0.91	30.80 ± 1.37	0.84 ± 0.10	0.79 ± 0.11	99 ± 1	0.89 ± 0.01
海口镇	16.20 ± 1.05	40.10 ± 2.62	1.08 ± 0.49	1.04 ± 0.41	57 ± 14	0.51 ± 0.13
白山湾	22.50 ± 2.65	69.50 ± 3.95	0.95 ± 0.22	0.84 ± 0.13	52 ± 3	0.47 ± 0.03

富善村水域凤眼莲未能存活。

## 2.4 凤眼莲氮磷富集能力

滇池不同水域凤眼莲植株氮磷含量检测结果见表 4。由表 4 可知,外草海凤眼莲植株茎干粗壮,叶片肥大,根冠比值(鲜质量)为 0.30,即茎叶部分质量约占整株质量的 76.9%,而茎叶部分是凤眼莲植株体内氮磷的主要富集区,故外草海凤眼莲对水体

通过对比可知,凤眼莲在滇池草海水域(外草海、老干鱼塘)和外海水域的生长特性明显不同,草海水域因水面平稳、水质污染严重,凤眼莲的株高、分蘖速率和生长速率明显高于外海水域,而根长则小于外海。按照滇池气候条件,凤眼莲生长期可从 5 月持续到 10 月,以外草海试验点凤眼莲的累积生物量  $85.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  计算,即年凤眼莲鲜草产量约  $853.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

中氮磷的富集能力最强,凤眼莲植株 TN、TP 含量最高,分别为  $32.9$  和  $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。老干鱼塘水体 pH 值明显高于外草海, TN、TP 浓度低于外草海,凤眼莲生长受到影响,累积生物量较低,植株氮磷含量也相对较低。

表 4 滇池不同水域凤眼莲植株氮磷富集能力

Table 4 Accumulation ability to N and P of *Eichhornia crassipes* in different water areas of Dianchi Lake

试验水域	累积生物量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	$w^1)/(g \cdot kg^{-1})$			N 吸收量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	P 吸收量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
		干物质含量	TN	TP		
外草海	853.7	51.6 ± 1.4	32.9 ± 0.2	8.2 ± 0.3	1.449	0.361
老干鱼塘	432.0	63.5 ± 3.2	16.5 ± 0.7	5.9 ± 0.5	0.453	0.162
龙门村	248.0	62.3 ± 3.2	25.8 ± 1.8	7.5 ± 1.0	0.399	0.116
海口镇	187.2	62.9 ± 1.6	14.1 ± 1.5	2.8 ± 0.3	0.166	0.033
白山湾	270.0	68.9 ± 5.6	15.0 ± 0.8	6.4 ± 0.4	0.279	0.119

富善村水域凤眼莲未能存活。1) 凤眼莲生长旺盛期监测数据的平均值。

龙门村水域水体(对照区) TN、TP 含量在外海中相对较高,分别为  $4.28$  和  $0.282 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,凤眼莲植株氮磷含量也相对较高,但由于高密度蓝藻生物竞争等因素的影响,凤眼莲累积生物量远低于外草海。外海白山湾水域水质较好, TN、TP 含量相对较低,凤眼莲植株 TN、TP 含量明显低于外草海,分别为  $15.0$  和  $6.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,植株茎干和叶片瘦长,分蘖较少,根系发达,根冠比值(鲜质量)为 0.95,即茎叶部分质量约占整株质量的 51.3%,根系部分质量约占整株质量的 48.7%,这也证实低氮磷浓度会使凤眼莲根系长度明显增加,以实现营养最大程度

地吸收<sup>[7-8]</sup>。

通过对比可知,外草海水域水体 TN、TP 含量较高,凤眼莲植株富集氮磷的能力最强,而外海水域水体 TN、TP 含量相对较低,其凤眼莲植株富集氮磷的能力劣于外草海。凤眼莲对水体氮磷吸收总量的计算公式为

$$A_N = Q \times w_d \times w_N \times 10^{-4}, \quad (2)$$

$$A_P = Q \times w_d \times w_P \times 10^{-4}. \quad (3)$$

式(2)~(3)中,  $A_N$  和  $A_P$  分别为凤眼莲对水体氮和磷的吸收总量,  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $Q$  为凤眼莲累积生物量,

$t \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $w_d$  为凤眼莲植株干物质质量含量, %;  $w_N$  为凤眼莲植株 TN 质量含量, %;  $w_P$  为凤眼莲植株 TP 质量含量, %。通过计算可知, 外草海通过种养凤眼莲, 每年可从水体吸收的氮磷总量分别高达 1.449 和 0.361  $t \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比外海各试验水域分别高 2.6~7.7 和 2.0~9.9 倍(表 4)。

### 3 讨论

笔者试验表明凤眼莲的生长状况明显受水体 pH 值的影响。外草海水体 pH 值为 7.74, 接近中性, 凤眼莲长势良好, 茎叶粗壮, 叶片深绿; 而老干鱼塘水体 pH 值为 9.50, 凤眼莲生长缓慢, 植株矮小, 叶片泛黄。严国安等<sup>[9]</sup>的研究也显示, 适宜凤眼莲生长的水体 pH 值为 6.0~9.0, 最佳 pH 值为 6.9~7.0, 当 pH 值 <4 或 >12 时对凤眼莲有致死效应。

该试验中水体氮磷浓度对凤眼莲生长有直接影响。外草海为重度富营养化水域, 水体氮磷浓度较高, 凤眼莲生长速率最高, 株高最大, 分蘖数最多, 累积生物量最大, 氮磷富集能力最强; 而外海白山湾水域水质相对较好, 水体氮磷浓度较低, 凤眼莲生长速率较低, 根系较长, 分蘖数较少, 累积生物量和氮磷富集量远低于外草海。已有研究也表明, 在缺乏氮磷的条件下, 凤眼莲生长会受到明显抑制, 且水体氮含量是限制凤眼莲生长的最主要因素, 磷的影响相对较弱<sup>[10]</sup>。

另外, 控养水域风浪的强弱程度对凤眼莲的生长状况也会产生较大影响。草海水域位于昆明市, 面积较小, 约为 10.67  $\text{km}^2$ , 水深平均为 1~2 m, 绝大部分时间风平浪静, 控养围栏内的凤眼莲容易成活, 长势良好, 且迅速形成优势种群。而外海水域面积较大, 约为 288  $\text{km}^2$ , 水深最大为 10 m, 常年盛行西南风, 风浪远强于草海, 因此凤眼莲的生长状况劣于草海, 特别是外海富善村水域, 由于风浪拍打, 控养围栏内放养的凤眼莲植株和根系均严重损伤, 最终未能成活。

另有研究显示, 凤眼莲根系可以向水体释放  $\text{O}_2$ , 在根系活性表面形成  $\text{O}_2$  逐级渗透的微生物生物膜, 凤眼莲根系发达, 长度可达 5~100 cm, 1 kg 干物质的根系表面积可达 2.5~8.0  $\text{m}^2$ , 能够为微生物提供良好的附着和繁殖界面, 形成凤眼莲-根际微生物非特异性结合的根际微生态系统, 为微生物降解提供良好的根际微域环境, 进而增强对富营养化水体的净化效果<sup>[11-13]</sup>。

综上所述, 由于 pH 值接近中性, 水体氮磷含量较高且风浪较小等因素, 外草海水域控养的凤眼莲生长速率最高, 累积生物量最大, 对氮磷的富集效果最好。因此, 在利用凤眼莲修复富营养化湖泊时, 应选择风浪小、水面相对平稳、水质污染相对严重、入湖河道相对集中的水域作为种养区域, 并定期打捞与采收<sup>[14]</sup>, 以充分发挥凤眼莲吸收氮磷的潜力, 增强凤眼莲根系微生物的降解作用, 从而加快富营养化湖泊内源污染物的清除速度。

### 参考文献:

- [1] 张志勇, 刘海琴, 严少华, 等. 凤眼莲去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(5): 1039-1046.
- [2] 窦鸿身, 濮培民, 张圣照, 等. 太湖开阔水域凤眼莲的放养实验[J]. 植物资源与环境, 1995, 4(1): 54-60.
- [3] 蒋艾青. 凤眼莲对城郊污水鱼塘的净化试验[J]. 淡水渔业, 2003, 33(5): 43-44.
- [4] 吴振斌. 凤眼莲净化燕山石油化工废水的研究 I: 动态模拟试验[J]. 水生生物学报, 1986, 10(2): 139-150.
- [5] EL-GENDY A. Leachate Treatment Using Natural Systems [D]. Windsor: University of Windsor, 2003.
- [6] 孙山. 开放式水体控制性种养凤眼莲技术用的化浪浮床: 中国, 200920037084 [P]. 2010-02-03.
- [7] 赵月琴, 卢剑波, 朱磊, 等. 不同营养水平对外来物种凤眼莲生长特征及其竞争力的影响[J]. 生物多样性, 2006, 14(2): 159-164.
- [8] XIE Yong-hong, YU Dan. The Significance of Lateral Roots in Phosphorus (P) Acquisition of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Aquatic Botany, 2003, 75(4): 311-321.
- [9] 严国安, 任南, 李益健. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响[J]. 环境科学与技术, 1994(1): 2-5, 27.
- [10] 周喆. 水质条件对外来入侵生物凤眼莲生长的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [11] KIM Y, KIM W J. Roles of Water Hyacinths and Their Roots for Reducing Algal Concentrations in the Effluent From Waste Stabilization Ponds [J]. Water Research, 2000, 34(13): 3285-3294.
- [12] YI Q, KIM Y, TATEDA M. Evaluation of Nitrogen Reduction in Water Hyacinth Ponds Integrated With Waste Stabilization Ponds [J]. Desalination, 2009, 249(2): 528-534.
- [13] 夏会龙, 吴良欢, 陶勤南. 凤眼莲加速水溶液中马拉硫磷降解[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6): 553-555.
- [14] 张志勇, 常志州, 刘海琴, 等. 不同水力负荷条件下凤眼莲去除氮、磷效果比较[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2): 148-154.

作者简介: 张迎颖(1980—), 女, 江苏响水人, 助理研究员, 博士, 主要从事富营养化水体水生植物修复方面的研究。E-mail: fly8006@163.com