

星云湖种植空心菜生长量及净化湖水效果分析

杨绍聪, 吕艳玲, 沐 婵, 张艳军, 张 钟, 李晓亮, 钱荣青, 李泉清

(玉溪市农业科学院, 云南 玉溪 653100)

摘要:针对当前星云湖中度富营养化(劣 V 类)水质的实际问题,采用漂浮种植设施直接在星云湖湖面种植空心菜(*Ipomoea aquatica*),开展适应性生长试验和湖水养分吸收净化试验的研究。结果表明:空心菜能够很好地适应生长于低浓度养分的星云湖水体环境(全 N $2.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、水溶性 N $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、水溶性 P $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),并且前期表现为较短的缓苗期(7 d),后期则枝叶生长旺盛;在空心菜的 6 次茎叶收割周期中,其生长量呈现出“先增后降”的趋势,且茎叶生长量较高,空心菜的茎叶鲜重达 $75\,555 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,生长量为 $1\,260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;空心菜的养分含量主要分配在茎叶,茎叶中总 N、总 P、总 K 含量分别为 3.43%、0.74%、6.25%;空心菜对星云湖湖水养分具有较强的吸收净化能力,吸收星云湖湖水中的 N、P、K 量分别为 259.05 、 55.21 、 $469.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,净化星云湖湖水的量以水溶性 N、水溶性 P、水溶性 K 计,分别为 $129\,525$ 、 $120\,022$ 、 $34\,220 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;空心菜的生长量与茎叶养分吸收量和湖水养分量之间存在一定的相关性。利用空心菜漂浮种植于星云湖水面,产生了明显的经济效益及显著的生态效益。

关键词:星云湖水;养分;空心菜;生长量;适应性生长;吸收净化

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2016)02-0142-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0222

引用格式:

杨绍聪, 吕艳玲, 沐 婵, 等. 星云湖种植空心菜生长量及净化湖水效果分析[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2): 142-148.

YANG Shao-cong, LÜ Yan-ling, MU Chan, et al. Growth Amount and Purification Effectiveness of *Ipomoea aquatica* Planted on Lake Water Surface of Xingyun Lake in Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2): 142-148.

Growth Amount and Purification Effectiveness of *Ipomoea aquatica* Planted on Lake Water Surface of Xingyun Lake in Yunnan Province, China

YANG Shao-cong, LÜ Yan-ling, MU Chan, ZHANG Yan-jun, ZHANG Zhong, LI Xiao-liang, QIAN Rong-qing, LI Quan-qing
(Yuxi Academy of Agricultural Sciences, Yuxi 653100, China)

Abstract: It was reported that *Ipomoea aquatica* planted in floating-bed had a high purification effectiveness on river water flowing to Xingyun Lake in Yunnan Province and high productivity mostly consisted of stems and leaves. However, if the *Ipomoea aquatica* in floating-bed are planted on lake water surface of Xingyun Lake, we don't know what will happen. For this, *Ipomoea aquatica* were directly planted on lake water surface of Xingyun Lake to study the growth of *Ipomoea aquatica* and its lake water purification effectiveness. Results showed that *Ipomoea aquatica* well adapted to lake water environment with low concentration nutrients (total N $2.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, water-soluble N $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and water-soluble P $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), and it showed that there was a relatively short and slow seedling periods in the early stage (7 days), and then there was a strong growth periods of stems and leaves in the late stage. During 6 harvest cycles of stems and leaves, *Ipomoea aquatica* had a trend of increasing first and then decreasing in growth amount, and had high stems and leaves biomass with fresh weight $75\,555 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $1\,260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ of growth amount. Nutrient content of *Ipomoea aquatica* were mostly distributed in the stems and leaves, where amounts of total N, total P and total K were 3.43%, 0.74% and 6.25%, respectively. There was a high absorption and purification abilities of *Ipomoea aquatica* on Xingyun Lake water. Amounts of N, P and K absorbed by *Ipomoea aquatica* from lake water were $259.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $55.21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $469.84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Amounts of lake water purified by *Ipomoea aquatica* calculated by water-soluble N, water-soluble P and water-soluble K were $129\,525 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $120\,022 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $34\,220 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The growth amount of *Ipomoea aquatica* was correlated with its absorption and purification on lake water. Therefore, it is obvious that planting *Ipomoea aquatica* on lake surface of Xingyun Lake not only improves water quality, but also provides significant economic benefits.

Keywords: water in Xingyun Lake; nutrient; *Ipomoea aquatica*; growth amount; adaptive growth; absorption and purification

收稿日期:2015-09-07

基金项目:玉溪市农业科学院重大科技项目(2011yxnk01)

作者简介:杨绍聪(1962—),男,研究员,主要从事植物营养、施肥与农业环境研究。E-mail:13887750760@163.com

星云湖是云南省九大高原湖泊之一,其位于云南省江川县城东北,东经 $102^{\circ}45'$,北纬 $24^{\circ}17'$,海拔 1 722 m,平均水深 7 m,容水量 1.84 亿 m^3 ^[1],湖水当前处于中度富营养化水平(劣 V 类)。水葫芦(*Eichharia crassipes*)一直以来被人们广泛用于湖水吸收净化的试验研究和实践应用^[2-4],云南省有关部门近两年来在星云湖的西南区域圈养水葫芦并发展到了 200 hm^2 左右,以期达到治理星云湖水体的目的。尽管水葫芦能够快速、高效地从水体中吸收氮、磷营养盐,对多种重金属具有较强的吸收和转运能力,且对受污染水体具有较好的修复作用^[5-8],然而,由于水葫芦植物的资源化开发利用成本较高、价值较低,很少进行打捞清理,而让其自然生长,到了秋冬季节根系腐烂,茎叶也随之枯黄脱落而腐烂,对水体易产生次生污染^[8-11],最终会导致生态链失衡,破坏水域生态环境及水体生态系统的生物多样性^[12-13]。即使是进行了打捞清理而移离水体进行相关处理,其渗滤液也会造成二次污染^[14]。

为解决水葫芦在湖泊富营养化水体治理中的不足,笔者近年来尝试探索一种新的生态方法:漂浮种植空心菜,即浮床空心菜(*Ipomoea aquatica* planted in floating-bed)来治理富营养化水体。空心菜是一种对水体具有很强净化能力的水生植物,其用于吸收养分而治理污水或富营养化水的试验研究报道较多^[15-20]。

笔者已利用空心菜漂浮种植吸收入星云湖河水中的氮、磷等养分进行了试验示范,效果非常明显^[10],但浮床空心菜治理富营养化水体这一生态技术能否应用到星云湖湖面水体却尚未知,而直接利用水生植物于湖面漂浮种植净化水质的研究很少见有报道。另外,当在湖面种植空心菜时,“水体-植物”这一系统会受到风浪等很多自然因素干扰的影响,空心菜的生长及其水体净化如何等问题尚不清楚。针对此,我们于 2014 年 4 月—2014 年 10 月,采用漂浮种植设施,在星云湖种植水葫芦的西南方离湖岸 100 m 左右的湖水区域开展漂浮种植空心菜的适应性生长试验和湖水养分吸收净化试验的研究,以期星云湖水体生态系统的治理、利用和保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 湖面漂浮种植方法

在星云湖圈养的水葫芦区域离湖岸 100 m 处向湖心延伸为宽 50 m,与其垂直方向长 80 m 的区域为漂浮种植空心菜的水面积,四周用 5 cm 孔径的尼龙线网与水葫芦相隔离,在此区域设计试验,即设置安装 4 行 $\times$ 24 块(行距 1.85 m)的漂浮种植床(1 $\text{m}\times$ 1 $\text{m}\times$ 0.04 m 塑料泡沫)设施(图 1)。采用种子漂浮育苗方式培育空心菜苗,苗高 12 cm 左右时即可移栽,每平

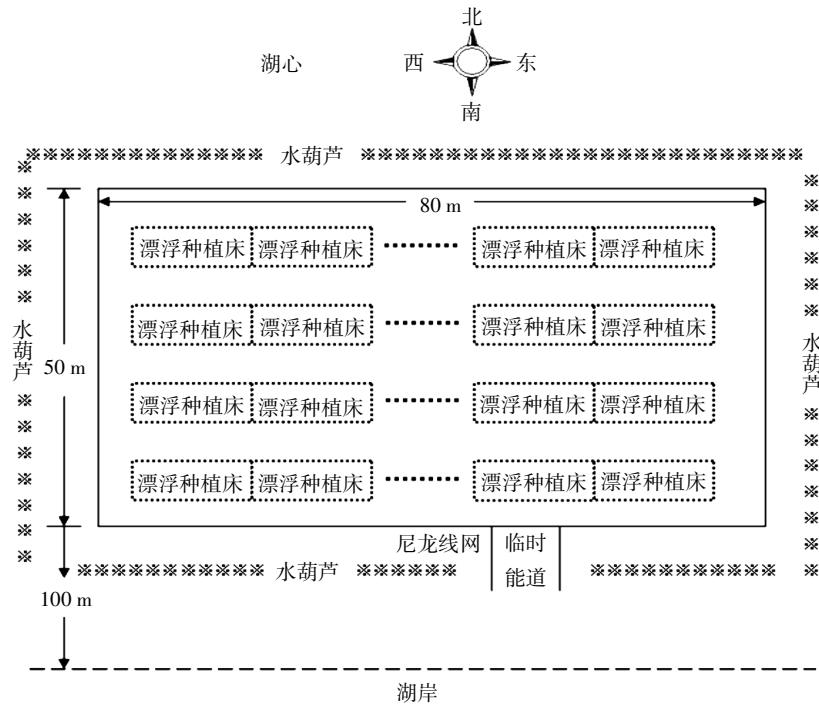


图 1 试验设计示意图

Figure 1 Sketch map of experimental design

方米种植床种植 70 株。2014 年 5 月 1 日定植空心菜苗,至 2014 年 10 月 22 日种植结束,植株高度达 30~40 cm 左右时,采用割剪方式收获茎叶(产品),期间共采收 6 次。

1.2 样品采集方法

在试验的 5—8 月,每 10 d 采集星云湖水水样及空心菜植株样,同时也采集相邻的水葫芦植株样。共采集了 12 套湖水样及植株样,其中湖水水样 12 个、空心菜茎叶样 12 个及根系样 12 个、水葫芦茎叶样 12 个及根系样 12 个,每个样品为 5 个采样点的混合样,测量植株样品各部位的鲜重和干重。

1.3 样品检测方法

测定茎叶和根系总 N 采用 GB 5009.5—2010 蒸馏滴定法,茎叶和根系总 P 采用 GB/T 5009.87—2003 酸消化-分光光度法,茎叶和根系总 K 采用 GB/T 5009.91—2003 酸消化-原子吸收法;测定水中全 N 为碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,水中铵态氮为纳氏试剂比色法,水中硝态氮为紫外分光光度法,水中水溶性 P 采用钼蓝比色法,水溶性 K 采用原子吸收分光光度法。检测单位为经云南省质量技术监督局资质认定的玉溪市农业分析测试中心。

1.4 数据统计

空心菜对湖水的净化水量估算,用单位面积空心菜吸收的 N、P 养分量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),与湖水中的水溶性 N 含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和水溶性 P 含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)进行等量比照,来说明净化水量,其公式 $M=[(m_1 \times h_1 + m_2 \times h_2)/C] \times 10$,式中 M 为每公顷空心菜净化水量, m^3 ; m_1 、 m_2 分别为每公顷每季空心菜的茎叶和根系平均产量(干基), kg ; h_1 、 h_2 分别为空心菜的茎叶和根系的养分含量(干基),%; C 为湖水的养分含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 10 为单位换算系数。

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据处理,用 SPSS 12.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 星云湖湖面空心菜的生长量

2014 年 5 月 1 日开始种植空心菜,种植后叶色发黄,有近 7 d 的缓苗期。经分析,苗叶发黄的主要原因是育苗床的养分浓度远高于湖水的养分浓度,两者形成了较大的养分浓度差环境,空心菜植株需要一定时期来过渡调节和适应此环境。但空心菜的根系生长正常。种植 10 d 后,分枝产生,生长加快,叶色逐渐长绿,叶面积进一步加大,植株生长茂盛,到 2014 年 6

月 5 日时株高达 35 cm,叶色浓绿。空心菜茎叶生长期间收割 6 次。进行第 1 次收割,净面积的茎叶产量达 $37\,200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均生长量达 $1\,065 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。第 1 次收割后,由于空心菜已形成了强大的根系,此时正值气温较高,生长迅速,枝叶茂盛,叶色浓绿,当到 2014 年 6 月 26 日(生长周期仅为 21 d)时,空心菜生长势达到最大,株高达 42.3 cm,平均每日生长 2.01 cm,茎叶产量净面积达 $38\,880 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均生长量达 $1\,845 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。余下的 4 个生长周期,空心菜生长量逐渐降低。经过 6 次收割,净面积的空心菜茎叶鲜重总产量可达 $215\,865 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,种植区的空心菜茎叶鲜重总产量达 $75\,555 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,生长量为 $1\,260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (表 1)。

表 1 星云湖湖面种植空心菜不同时段的增长量

Table 1 Growth amount of *Ipomoea aquatica* planted on lake surface of Xingyun Lake in different time periods

生长周期 (月/日— 月/日)	生长 时间/ d	收获株 高/cm	实产/ kg	产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$		生长量	
				净面积	种植区	株高/ cm	净面积生长量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$
5/1—6/5	36	35.0	357	37 200	13 020	0.97	1 065
6/6—6/26	21	42.3	373	38 880	13 605	2.01	1 845
6/27—7/25	29	39.0	363	37 800	13 230	1.34	1 305
7/26—8/22	28	30.0	347	36 135	12 645	1.07	1 335
8/23—9/20	29	29.5	327	34 050	11 910	1.02	1 215
9/21—10/22	32	28.2	305	31 815	11 145	0.94	990
5/1—10/22	175	—	2 071	215 865	75 555	—	1 260±304

注:每次实收净面积(浮床面积)为 96 m^2 ;种植区产量按浮床种植面积 35%计,产量为茎叶鲜重。

Note: Every harvest net areas(floating-bed areas) were 96 m^2 ; Yield in planted area was counted by 35% of floating-bed areas and indicated as fresh weight in stems and leaves.

2.2 星云湖湖面空心菜植株的氮、磷养分含量

空心菜漂浮种植生长在星云湖水面条件下,通过 6 次采集空心菜茎叶样检测 N、P、K 等养分含量,结果表明(表 2),空心菜植株养分在不同部位分布存在明显差异,养分大部分积累在茎叶中,茎叶中总 N、总 P、总 K 含量分别为 3.43%、0.74%和 6.25%,分别比根系的总 N、总 P、总 K 提高 36.1%、57.4%和 43.3%,表明了空心菜从湖水中吸收的养分主要同化储存在茎叶中。

2.3 星云湖湖面空心菜养分吸收量及净化效果

在星云湖湖面,空心菜以实际种植面积 35%的种植区进行养分吸收量计算和净化湖水量估算(表 3)。空心菜从湖水中吸收的 N、P、K 量分别为 259.05、

55.21、469.90 kg·hm⁻²·a⁻¹, 其中养分绝大部分是被空心菜的茎叶吸收, 占总吸收量(784.16 kg·hm⁻²·a⁻¹)的 91.4%, 为 716.64 kg·hm⁻²·a⁻¹, 说明了空心菜对星云湖水养分具有较强的吸收能力。

根据对星云湖水的水溶性 N、水溶性 P、水溶性 K 的 24 次监测结果(分别平均为 2.00、0.46、13.73 mg·L⁻¹), 结合湖面单位面积空心菜每年的平均产量(干重)及其 N、P、K 的平均含量(表 2 和表 3)对星云湖水净化量进行估算。结果表明, 空心菜可净化的星云湖湖水量, 以水溶性 N 计为 107 115~132 690 m³·hm⁻²·a⁻¹, 平均为 129 525 m³·hm⁻²·a⁻¹; 以水溶性 P 计为 100 391~122 891 m³·hm⁻²·a⁻¹, 平均为 120 022 m³·hm⁻²·a⁻¹; 以水溶性 K 计为 26 136~35 053 m³·hm⁻²·a⁻¹, 平均为 34 220 m³·hm⁻²·a⁻¹(表 3), 由此说明了空心菜对星云湖湖水养分具有较强的净化能力。

表 2 星云湖湖面种植的空心菜不同部位养分含量

Table 2 Nutrient content in different parts of *Ipomoea aquatica* planted on lake surface of Xingyun Lake

项目	根系养分含量(干基)/%			茎叶养分含量(干基)/%		
	N	P	K	N	P	K
平均值	2.52	0.47	4.36	3.43	0.74	6.25
标准差	0.24	0.02	0.41	0.37	0.03	0.52
最大值	2.78	0.52	4.87	3.92	0.93	7.32
最小值	2.12	0.37	4.07	2.71	0.61	5.55

表 3 星云湖湖面种植的空心菜的养分吸收净化量

Table 3 Nutrient absorption and purification amount of *Ipomoea aquatica* planted on lake surface of Xingyun Lake

项目	植株干重/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹		养分吸收量/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹									净化湖水量/m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹		
	根系	茎叶	根系			茎叶			全株			以水溶性 N 计	以水溶性 P 计	以水溶性 K 计
			N	P	K	N	P	K	N	P	K			
平均值	918	6 878	23.13	4.31	40.02	235.92	50.90	429.82	259.05	55.21	469.84	129 525	120 022	34 220
标准差	16.5	97.5	2.13	1.2	12.3	25.21	6.26	42.9	27.34	7.46	55.20	13 670	16 217	4 020
最大值	987	7 012	24.87	4.64	43.03	240.51	51.89	438.25	265.38	56.53	481.28	132 690	122 891	35 053
最小值	784	5 805	20.82	3.82	33.54	193.41	42.36	325.31	214.23	46.18	358.85	107 115	100 391	26 136

表 4 星云湖湖面种植的空心菜生长及茎叶养分吸收量和湖水养分含量间的比较

Table 4 Comparison between growth of *Ipomoea aquatica*, nutrient absorption amount in stems and leaves and nutrient amount in lake water of Xingyun Lake

观测时间	分枝/个	植株高/cm		茎叶重/g·株 ⁻¹		茎叶养分吸收量/%			湖水水溶性养分含量/mg·L ⁻¹		
		分枝	主枝	鲜重	干重	N	P	K	N	P	K
6 月 12 日	5.5	5.2	10.2	12.5	1.15	3.74	0.750	5.78	2.29	0.57	12.31
6 月 19 日	5.5	21.8	27.6	30.5	2.78	3.71	0.708	6.44	2.07	0.55	12.26
6 月 26 日	5.5	31.5	42.3	55.5	5.05	3.78	0.735	7.32	2.10	0.53	12.22

注:6 月 5 日第一次收割,6 月 26 日第二次收割。

Note: The first harvest of *Ipomoea aquatica* was in June 5th, the second harvest was in June 26th.

2.4 星云湖湖面空心菜生长与植株茎叶营养和湖水养分之间的关系

当空心菜适应星云湖水环境后,植株(分枝、主枝)高度逐渐增高,茎叶重增加,虽然茎叶养分相对吸收量变化不明显,但茎叶对星云湖湖水的 N、P、K 绝对吸收量(茎叶干重与相对养分含量的积)是明显增加的,导致湖水水溶性养分含量略显下降趋势,但整体趋势不太明显(表 4),表明了空心菜的生长量与茎叶养分吸收量和湖水养分量之间存在着一定的相关性。

3 讨论

以往关于空心菜用于水体净化的试验研究较多集中在高浓度养分(TN>4 mg·L⁻¹)的水体环境^[10,21-22],而用于低浓度养分水体净化研究^[23]却很少,尤其在湖面水体上的研究更是至今尚未见报道,这可能主要是由于湖面水体上开展试验在操作技术上比较困难所致。笔者通过采用漂浮种植设施,利用星云湖低浓度养分水体(TN<3 mg·L⁻¹)(表 5)开展空心菜适应性生长和湖水养分吸收净化的试验研究,获得了重要研究结果。本研究说明了空心菜能够适应星云湖湖面水体环境,而且生长茂盛,净面积每季每平方米水面空心菜茎叶鲜重达 21.6 kg,这与李文祥等^[23]对低浓度水体的研究结果一致。

利用星云湖湖面种植空心菜,植株生长旺盛(表

1), 获得了较高的茎叶生物产出, 茎叶鲜重产量达到 $75\,555\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 按当地空心菜批发单价 $1.3\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 初步估算, 湖面漂浮种植空心菜产值可达 $98\,222\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 经济效益明显。与星云湖沿岸池塘漂浮种植空心菜的产量 ($112\,032.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[10] 相比, 星云湖湖面种植空心菜的产量下降了 32.6%, 这主要是由于星云湖水体环境的养分浓度低于星云湖沿岸池塘水体养分(表 6), 而空心菜的茎叶生物产出与水体养分正相关^[10], 从而使得湖面空心菜吸收同化水体中养分的量(N、P、K 分别平均为 259.05、55.21、469.90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 低于星云湖沿岸池塘空心菜的吸收量(N、P、K 分别平均为 348.4、50.9、530.4 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)^[10], 结果导致湖面空心菜的茎叶产出低于了云湖沿岸池塘空心菜的茎叶产出量。

星云湖湖面空心菜种植区 4—7 月期间水体养分各月之间浓度变化差异不大, 与非种植区的湖水养分浓度相比不存在明显的差异(表 5), 这主要是与整个

星云湖湖面水体时常受着风浪的影响有关。然而, 进入 8 月份后, 由于空心菜种植区的外围水葫芦生长量已达最大, 空心菜种植区的水体受风浪干扰的影响较小, 水体环境相对稳定, 基本上处于静态, 而静态条件下的空心菜对水体养分具有相当高的去除率^[10], 从而导致了 8 月份的水体养分浓度较之前的 4—7 月有明显的下降趋势(表 5), 由此表明了, 星云湖湖面空心菜的水体净化效果存在着明显的时间差异, 这也解释了当空心菜的生长量增加时, 湖水水溶性养分含量为什么下降趋势会出现不明显(表 4)的现象。

星云湖湖面空心菜植株的养分主要分配在茎叶中, 湖水中 N、P、K 养分绝大部分是被空心菜的茎叶吸收(表 2 和表 3), 这与星云湖沿岸池塘漂浮种植空心菜对水体养分吸收同化的机理^[10]是相一致的, 这说明了尽管星云湖湖面水体与星云湖沿岸池塘水体存在较大养分差异(表 6), 但水体养分浓度差异并不会影响空心菜对水体养分吸收同化的机理。

表 5 不同时段星云湖空心菜种植区和非种植区域的湖水养分含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值 $\pm$ 标准差)

Table 5 Comparison between lake water nutrient in planted areas and non planted areas of *Ipomoea aquatica* ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Mean $\pm$ SD)

时段/类型	NH_4^+	NO_3^-	水溶性 N	全 N	水溶性 P	水溶性 K
种植区 4 月	0.42 $\pm$ 0.04	1.76 $\pm$ 0.14	2.18 $\pm$ 0.14	2.35 $\pm$ 0.15	0.47 $\pm$ 0.04	13.69 $\pm$ 1.41
种植区 5 月	0.53 $\pm$ 0.33	1.69 $\pm$ 0.38	2.21 $\pm$ 0.13	2.42 $\pm$ 0.12	0.39 $\pm$ 0.07	12.67 $\pm$ 0.46
种植区 6 月	0.79 $\pm$ 0.18	1.36 $\pm$ 0.21	2.15 $\pm$ 0.12	2.37 $\pm$ 0.19	0.55 $\pm$ 0.02	12.26 $\pm$ 0.05
种植区 7 月	0.81 $\pm$ 0.17	1.39 $\pm$ 0.13	2.20 $\pm$ 0.09	2.51 $\pm$ 0.19	0.40 $\pm$ 0.01	18.87 $\pm$ 1.94
种植区 8 月	0.64 $\pm$ 0.08	0.89 $\pm$ 0.08	1.53 $\pm$ 0.04	1.75 $\pm$ 0.25	0.55 $\pm$ 0.02	11.15 $\pm$ 2.09
种植区平均	0.65 $\pm$ 0.21	1.35 $\pm$ 0.21	2.00 $\pm$ 0.12	2.41 $\pm$ 0.35	0.46 $\pm$ 0.15	13.73 $\pm$ 2.01
非种植区平均	0.59 $\pm$ 0.12	1.36 $\pm$ 0.16	1.95 $\pm$ 0.24	2.38 $\pm$ 0.41	0.45 $\pm$ 0.05	13.18 $\pm$ 0.40

注: 非种植区域湖水样品的采集数量为 16 个, 采集时间为 7 月, 其范围包括了星云湖由北向南的西边及西南边的广大区域。

Note: Lake water in non planted areas was collected by 16 samples in July, and areas were sampled in west and southwest of the Xingyun Lake.

表 6 星云湖沿岸及湖面主要水生植物生长和净化水体效果比较

Table 6 Comparison between growth and water body purification effectiveness of the main aquatic plants in coastal ponds and lake surface of Xingyun Lake

水生生态系统类型	水体养分/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水生植物	生长及利用价值情况	茎叶鲜重平均产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	植株茎叶 N、P、K 养分总含量/%	数据来源
星云湖沿岸池塘	全 N 15.31 $\pm$ 7.16; 水溶性 N 14.58 $\pm$ 6.75; 水溶性 P 0.82 $\pm$ 0.23	空心菜 (<i>Ipomoea aquatica</i>)	能够旺盛生长, 具有较高的茎叶生物产出量; 定期收获, 能形成农产品	112 032.0	8.47	杨绍聪等 ^[10]
星云湖沿岸池塘	水溶性 N 10.05; 水溶性 P 1.064	水葫芦 (<i>Eichharnia crassipes</i>)	生长的季节性变化明显, 冬季后植株停止生长甚至死亡腐烂, 生物量下降; 利用价值低	—	6.03	杨绍聪等 ^[9]
星云湖湖面	全 N 2.41 $\pm$ 0.35; 水溶性 N 2.00 $\pm$ 0.12; 水溶性 P 0.46 $\pm$ 0.15	空心菜 (<i>Ipomoea aquatica</i>)	可以适应湖面水体环境, 生长旺盛, 具有较高的茎叶生物量; 定期收获, 能形成农产品	75 555	10.42	本研究
星云湖湖面	全 N 2.41 $\pm$ 0.35; 水溶性 N 2.00 $\pm$ 0.12; 水溶性 P 0.46 $\pm$ 0.15	水葫芦 (<i>Eichharnia crassipes</i>)	生长的季节性变化明显; 即使打捞后也易产生水体次生污染	—	9.54	本研究

寻找一种生态、经济和高效的水生植物用于净化星云湖富营养化水体,一直是星云湖生态系统治理和保护工作的重点,为此,笔者近年来开展了大量的研究工作(表6)。本研究中,对星云湖湖面空心菜外围相邻的水葫芦也进行了样品采集调查和样品测定(图1、表6)。不同类型(星云湖水、湖岸池塘水)水生生态系统,空心菜和水葫芦的生长以及对水体养分吸收的差异非常明显(表6):尽管星云湖湖面水体养分比池塘水体养分低了很多,湖面空心菜的茎叶产量比池塘漂浮种植的产量降低32.6%,但湖面空心菜茎叶N、P、K养分相对含量却是最大(10.42%),说明空心菜可以很好地适应生长于低浓度养分的湖面水体环境中,并表现出对水体中N、P、K养分吸收力较强的特性。同样,水葫芦在湖面的茎叶N、P、K养分相对含量为9.54%,比高浓度养分池塘中的提高了58.2%。在同一类型的水生生态系统中(星云湖水、湖岸池塘水),空心菜植株N、P、K养分含量高于水葫芦,且水葫芦存在二次水体污染,植株没有明显的经济利用价值,因此,发展星云湖湖面空心菜种植,将是星云湖水体生态系统治理和保护的一个重要方向。

笔者将星云湖沿岸池塘漂浮种植空心菜的这一生态技术,直接延伸到水质为中度富营养化水平(为劣V类)的星云湖湖面进行适应性试验种植,获得了重要结论:低浓度养分水体条件下的空心菜生长旺盛、对湖水养分吸收量大、净化湖水的效果显著,这对星云湖劣V类水质的治理提供了一个较好的方法。由于本试验研究区域外围有水葫芦,受风浪的影响较小,基本上对漂浮设施没有影响,在星云湖湖面用空心菜替代水葫芦的种植,尚需研究抗风浪的漂浮种植设施,才能形成配套的星云湖湖面空心菜种植技术。

4 结论

(1)利用星云湖水较低的养分能够种植出高产而质优的空心菜农产品,茎叶鲜重达 $75\,555\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (按35%水面种植面积计),产值可达 $98\,222\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,经济效益明显。

(2)在星云湖水低浓度养分条件下,空心菜茎叶中总N、总P、总K含量分别为3.43%、0.74%和6.25%,说明空心菜对低浓度的湖水N、P、K养分的吸收能力较强。

(3)在星云湖湖面,空心菜按种植面积35%计,空心菜从湖水中吸收带走的N、P、K量分别为259.05、55.21、469.84 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其可净化的湖水量以水溶

性N计为 $129\,525\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、以水溶性P计为 $120\,022\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、以水溶性K计为 $34\,220\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,生态效益显著。

参考文献:

- [1] 张文,吕伟,李海涛.星云湖水富营养化的模糊决策分析[J]. 玉溪师范学院学报, 2002, 18(5):95-99.
ZHANG Wen, LV Wei, LI Hai-tao. Fuzzy decision-making analysis of eutrophication of water quality of Xingyun Lake[J]. *Journal of Yuxi Teachers College*, 2002, 18(5):95-99. (in Chinese)
- [2] 刘国锋,包先明,吴婷婷,等.水葫芦生态工程措施对太湖竺山湖水环境修复效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):352-360.
LIU Guo-feng, BAO Xian-ming, WU Ting-ting, et al. Purification of water in Zhushan Bay of Taihu Lake with water hyacinth ecological engineering[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):352-360. (in Chinese)
- [3] 吴富勤,申仕康,王跃华,等.风眼莲种植对滇池水体环境质量的影 响[J]. 生态科学, 2013, 32(1):110-114.
WU Fu-qin, SHEN Shi-kang, WANG Yue-hua, et al. Effect of *Eichhornia crassipes* plantation on water quality in the Dianchi Lake[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(1):110-114. (in Chinese)
- [4] 郑建初,常志州,陈留根,等.水葫芦治理太湖流域水体氮磷污染的可行性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 3:247-250.
ZHENG Jian-chu, CHANG Zhi-zhou, CHEN Liu-gen, et al. Feasibility study of hyacinth (*Eichhornia crassipes*) used in reducing nitrogen and phosphorus content in polluted water in the lake Taihu[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2008, 3:247-250. (in Chinese)
- [5] 张志勇,郑建初,刘海琴,等.风眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1):152-157.
ZHANG Zhi-yong, ZHENG Jian-chu, LIU Hai-qin, et al. Role of *Eichhornia crassipes* uptake in the removal of nitrogen and phosphorus from eutrophic waters[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1):152-157. (in Chinese)
- [6] 刘国锋,张志勇,严少华,等.大水面放养水葫芦对太湖竺山湖水环境净化效果的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(5):1299-1305.
LIU Guo-feng, ZHANG Zhi-yong, YAN Shao-hua, et al. Purification effects of large-area planting water hyacinth on water environment of Zhushan Bay, Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5):1299-1305. (in Chinese)
- [7] 严少华,王岩,王智,等.水葫芦治污试验性工程对滇池草海水体修复的效果[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(5):1025-1030.
YAN Shao-hua, WANG Yan, WANG Zhi, et al. Remediation effects of experimental project using water hyacinth for pollution control in the Lake Caohai, Dianchi[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(5):1025-1030. (in Chinese)
- [8] 华常春,高桂枝.水葫芦治理瘦西湖污染可行性分析[J]. 现代农业科技, 2010(5):265-266.
HUA Chang-chun, GAO Gui-zhi. Feasibility analysis on pollution control in Slender West Lake by hyacinth[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(5):265-266. (in Chinese)

- [9] 杨绍聪, 吕艳玲, 沐 婵, 等. 漂浮植物对入星云湖水净化效应分析[J]. 西南农业学报, 2014, 27(6):2580-2585.
YANG Shao-cong, LV Yan-ling, MU Chan, et al. Purification effectiveness of floating plants on river water flowing to Xingyun Lake in Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(6):2580-2585.(in Chinese)
- [10] 杨绍聪, 吕艳玲, 沐 婵, 等. 空心菜对入星云湖河水的净化及其生物产出分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2):370-376.
YANG Shao-cong, LÜ Yan-ling, MU Chan, et al. Water purification and productivity of *Ipomoea aquatica* grown on river water flowing to Xingyun Lake in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):370-376.(in Chinese)
- [11] 王一专, 吴竞仑. 中国水葫芦危害、防治及开发利用[J]. 杂草科学, 2004(3):6-9.
WANG Yi-zhuan, WU Jing-lun. The damage, control, development and utilization of water hyacinth in China[J]. *Weed Science*, 2004(3):6-9.(in Chinese)
- [12] 任东华, 高蓓蕾, 沈建康. 水葫芦在太湖流域的应用[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(7):59-61.
REN Dong-hua, GAO Bei-lei, SHEN Jian-kang. The application of water hyacinth in Taihu Lake basin[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2011, 29(7):59-61.(in Chinese)
- [13] 吴 丹, 望志方, 冯 利. 水葫芦繁殖过度的危害及其防治措施[J]. 环境科学与技术, 2001, 24(增刊):35-37.
WU Dan, WANG Zhi-fang, FENG Li. The harm of over-reproduce of water hyacinth and the preventive measure[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 24(suppl):35-37.(in Chinese)
- [14] 李文杰. 水葫芦用于水质污染治理的生态环境效应及其对策研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(3):55-57.
LI Wen-jie. Research on the ecological environment effect of water hyacinth using in the water pollution government and its countermeasure[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(3):55-57.(in Chinese)
- [15] 贾 悦, 李秀珍, 唐莹莹, 等. 不同采收方式对富营养化河道浮床空心菜生物产出的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(6):1091-1099.
JIA Yue, LI Xiu-zhen, TANG Ying-ying, et al. Effects of different cutting regimes on the productivity of *Ipomoea aquatica* Forsk planted on floating-mats in a eutrophicated river of Shanghai[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(6):1091-1099.(in Chinese)
- [16] 周真明, 陈灿瑜, 叶 青, 等. 浮床植物系统对富营养化水体的净化效果[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2010, 31(5):576-579.
ZHOU Zhen-ming, CHEN Can-yu, YE Qing, et al. Study on the purification effects of eutrophic water body in floating-bed plant systems[J]. *Journal of Huaqiao University(Natural Science)*, 2010, 31(5):576-579.(in Chinese)
- [17] 徐凌悦, 马宏海, 王晨雯, 等. 2 种浮床植物吸收不同 N/P 水体中氮磷的研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(3):8-11.
XU Ling-yue, MA Hong-hai, WANG Chen-wen, et al. Removal of nitrogen and phosphorus by two plants cultivated on floating bed at different N/P ratios[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(3):8-11.(in Chinese)
- [18] 刘晓丹, 李 军, 龚一富, 等. 5 种水培植物对富营养化水体的净化能力[J]. 环境工程学报, 2013, 7(7):2607-2612.
LIU Xiao-dan, LI Jun, GONG Yi-fu, et al. Purification of eutrophic water by five aqua-cultured plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(7):2607-2612.(in Chinese)
- [19] 陈丽丽, 李秋华, 高廷进, 等. 模拟生态浮床种植 6 种水生植物改善水质效果研究[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(4):78-83.
CHEN Li-li, LI Qiu-hua, GAO Ting-jin, et al. Research on water quality improvement effect by 6 kinds of aquatic plants on simulation ecological floating bed[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(4):78-83.(in Chinese)
- [20] 顾国平, 周丽燕, 王 森. 空心菜对景观水中氮磷的去除效果研究初报[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(19):111-112.
GU Guo-ping, ZHOU Li-yan, WANG Sen. Primary study on the removal efficiency of nitrogen and phosphorus of eutrophic water body by planted float *Ipomoea aquatica* forsk[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(19):111-112.(in Chinese)
- [21] 陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 空心菜浮床栽培对集约化养殖鱼塘水质的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(2):155-159.
CHEN Jia-zhang, MENG Shun-long, HU Geng-dong, et al. Effect of *Ipomoea aquatica* cultivation on artificial floating rafts on water quality of intensive aquaculture ponds[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2):155-159.(in Chinese)
- [22] 汪松美, 周晓红, 储金宇, 等. 空心菜浮床+仿生植物系统对污染物去除效果[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(3):78-82.
WANG Song-mei, ZHOU Xiao-hong, CHU Jin-yu, et al. Pollutant removal efficiency by using compound systems of *Ipomoea aquatica* ecological floating bed and bionic macrophytes[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 36(3):78-82.(in Chinese)
- [23] 李文祥, 李 为, 林明利, 等. 浮床水蕹菜对养殖水体中营养物的去除效果研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8):1670-1675.
LI Wen-xiang, LI Wei, LIN Ming-li, et al. In situ nutrient removal from aquaculture wastewater by the aquatic vegetable *Ipomoea aquatica* on floating beds[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8):1670-1675.(in Chinese)