

空心菜对入星云湖河水的净化及其生物产出分析

杨绍聪, 吕艳玲, 沐 婵, 张艳军, 钱荣青, 李晓亮, 李泉清

(云南省玉溪市农业科学院, 云南 玉溪 653100)

摘 要:为充分开发利用入星云湖河水的 N、P 等营养资源,降低其富营养化水平,改善和保护星云湖生态系统,于 2010—2013 年采用微区试验与大区试验相结合、静态试验与动态试验相结合的方法,研究了漂浮空心菜(*Ipomoea aquatica*)对入星云湖水净化及其生物产出的规律。结果表明:漂浮空心菜对入湖河水具有较好的水质净化效应,静态条件下空心菜对入湖河水全 N、水溶性 P 的去除率高达 90%以上,动态条件下则达 50%左右,空心菜吸收入湖河水 N、P、K 的量分别平均为 348.4、50.9、530.4 kg·hm⁻²·a⁻¹,且其绝大部分被空心菜的茎叶吸收(占 93.0%,为 864.5 kg·hm⁻²·a⁻¹)。空心菜对入湖河水的净化量,以水溶性 N 计平均为 27 321 m³·hm⁻²·a⁻¹,以水溶性 P 计平均为 67 569 m³·hm⁻²·a⁻¹;空心菜的生长主要依赖入湖河水中 N、P 等营养物质(两者呈正相关),通过茎叶大量吸收并同化入湖河水中的 N、P 等养分后,空心菜获得了较高的茎叶生物产出量(占 90.9%,鲜重量平均为 112 032.0 kg·hm⁻²·a⁻¹)。利用入星云湖水漂浮种植空心菜,产生了明显的生态效益和经济效益。

关键词:空心菜;浮床;星云湖;入湖河水;净化效果;生物产出

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)02-0370-07 doi:10.11654/jaes.2015.02.022

Water Purification and Productivity of *Ipomoea aquatica* Grown on River Water Flowing to Xingyun Lake in Yunnan Province

YANG Shao-cong, LÜ Yan-ling, MU Chan, ZHANG Yan-jun, QIAN Rong-qing, LI Xiao-liang, LI Quan-qing

(Yuxi Academy of Agricultural Sciences, Yunnan Province, Yuxi 653100, China)

Abstract: Purification of eutrophic water by aquatic plants is an ecological practice widely used in recent years. To make use of N and P resources in river water flowing to Xingyun Lake in Yunnan Province, to reduce the lake eutrophication and to protect the lake ecosystem, micro-plot trials, macro-plot trials, static trials and dynamic trials were carried out from 2010 to 2013. The purification effectiveness and productivity of *Ipomoea aquatica* grown in floating-beds on river water were studied. Results showed that *Ipomoea aquatica* had a high purification effectiveness. Under static conditions, removal rates of total N and water-soluble P by *Ipomoea aquatica* from river water were greater than 90%, while the rates were about 50% under dynamic conditions. Average amount of N, P, and K absorption by *Ipomoea aquatica* in river water was 348.4 kg·hm⁻²·a⁻¹, 50.9 kg·hm⁻²·a⁻¹ and 530.4 kg·hm⁻²·a⁻¹, respectively. Most of these nutrients (93.0%) were accumulated in the stems and leaves of *Ipomoea aquatica*. Average amount of river water purified by *Ipomoea aquatica* calculated by water-soluble N and water-soluble P was 27 321 m³·hm⁻²·a⁻¹ and 67 569 m³·hm⁻²·a⁻¹, respectively. The growth of *Ipomoea aquatica* was positively correlated with N and P concentrations in the river water, and average fresh weight of stems and leaves was up to 112 032.0 kg·hm⁻²·a⁻¹. Therefore, it is obvious that growing *Ipomoea aquatica* in floating-bed on river water not only improves water quality in Xingyun Lake, but also provides significant economic benefits.

Keywords: *Ipomoea aquatica*; floating-bed; Xingyun Lake; river water flowing to lake; purification effectiveness; productivity

星云湖为云南九大高原湖泊之一,位于云南省江川县城东北,东经 102°45',北纬 24°17',海拔 1722

m,平均水深 7 m,容水量 1.84 亿 m³[1]。星云湖水质的变劣主要是源于人类多方面的活动干扰,其中一个重要的人为干扰当数 20 世纪 80 年代中后期迅速发展的湖岸鱼塘及湖中网箱养鱼业[2]。由于鱼饲料中丰富的 N、P 等营养以及在养殖过程中大量的粪便残饵等废物直接进入养殖水域,增加了水中有机物的含量以

收稿日期:2014-07-14

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

致水体富营养化^[3],表明湖岸及湖中养鱼业对星云湖水质量具有明显的影响。为此,江川县政府及相关部门在该区域采取了强制的禁渔措施,将入湖的河(沟)水先引入湖岸鱼塘,在其中通过种植漂浮的水葫芦(*Eichharnia crassipes*)、大藻(俗名水白菜,*Pistia stratiotes*)及挺水的茭白(*Zizania caduciflora*)和莲藕(*Nelumbo nucifera*)等植物,有效地改变了养鱼业对湖水的污染,然而由于这些水生植物的资源化开发利用成本较高、价值较低,基本上没有采取打捞清理措施而让其自然生长,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。因此,探寻能吸收入湖河水养分又有合理利用价值的植物成为考虑的重点。

利用水生植物来净化富营养化水体是近几年来广泛采用的生态方法,其主要原理是通过生物浮床技术,将水生植物种植于池塘中,通过植物的吸收、吸附作用和物种竞争相克机理,将水中 N、P 等污染物质转化成植物所需的能量储存于植物体中,实现水环境的改善^[4]。近年来,黑麦草(*Lolium mutliflorum*)、水芹菜(*Oenanthe javanica*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)等多种水生植物被广泛用于治理修复富营养化水体的研究和应用^[5-12],包括空心菜(*Ipomoea aquatica*)^[13-18]。然而,已有的研究报道主要集中在静态模拟条件下或温室内或小面积的小试试验(塑料水桶内培养等),侧重于单纯的净化效果,而针对多年现场动态条件下大面积水生植物对富营养化水体的净化效果、植株体内的养分迁移以及自身的生物产出等科学问题很少有报道,但这方面却是一个非常重要的生态系统过程,对富营养化水体的治理有着直接影响。因此,从静态与动态条件相结合的角度开展此方面的研究,具有重要意义。

于 2010—2013 年在星云湖沿岸的废弃鱼塘,利用入湖河水漂浮种植空心菜,并采用微区试验与大区试验相结合、静态试验与动态试验相结合的方法,研究了空心菜对入星云湖河水净化及其生物产出的规律,为进一步治理、开发及保护星云湖水水质资源提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 静态试验方法

1.1.1 大区试验方法

选择星云湖沿岸的池塘设计试验(图 1),共设置 1200 块(2 m×1 m×0.02 m 塑料泡沫)漂浮种植床,其

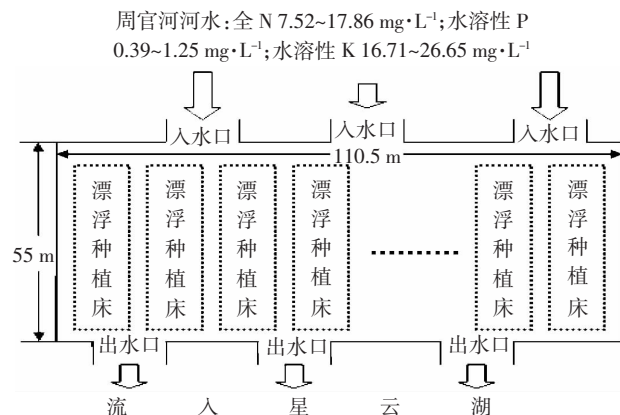


图 1 试验设计示意图

Figure 1 Sketch of experimental design

在池塘内呈行排列(48 行×25 块),行距 1.25 m,离埂有 2 m,漂浮种植床面积占池塘水面积 40%。采用种子及扦插苗并选择漂浮育苗方式培育空心菜苗,2 叶 1 心的菜苗即可移栽。4 月下旬定植空心菜苗,至 10 月上旬种植结束,塘内保持 0.6 m 的水位深度,植株高度达 30 cm 左右时,采用割剪方式收获茎叶(产品),共采收 6 次。为了最大限度吸收入湖河水中的养分,入湖河水的出水口与池塘的入水口保持相通,当空心菜第三次割剪后苗长至 10 cm 左右时,进行静态大区试验,截断池塘的入水口,用入湖河水静态培养空心菜,并观察空心菜的长势、长相,当空心菜叶色发黄时,静态试验结束,恢复入湖河水的出水口与池塘的入水口保持相通。大区静态试验于 2010 年 7 月 7 日开始,7 月 27 日结束,历时 20 d。参试品种为泰国竹叶空心菜,下同。

1.1.2 微区试验方法

为了进一步验证空心菜对入湖河水养分的吸收净化效果,在池塘内大区试验的基础上,于 2011 年 5 月至 6 月期间采用容积为 52 L 的塑料桶(直径 0.50 m、内高 0.38 m)实施微区试验。试验用水为池塘内的入湖河水,桶内参试植物采自池塘内的空心菜大苗(苗高 20 cm,2~3 个分枝),每桶栽 6 株,重复 4 次。试验过程中用去离子水进行水位调节。

1.2 动态试验方法

采用大区试验法,选择上一年度做静态大区试验的池塘进行动态试验。河床、池塘及湖面自然形成了由高到低的地势梯度变化,池塘的入水口与出水口一直保持畅通,使其连续进水连续出水(图 1),在塘内保持 0.6 m 的水位深度前提下,调节入水口与出水口的大小及流水量,在此动态水流条件下,培养并观察

空心菜的长势、长相,当空心菜叶色发黄时试验结束。2011—2013年间在每年的5月初至10月上旬实施动态试验。

1.3 样品采集方法

试验前与试验后采集池塘及入湖河的水样及空心菜植株样。水样采集点以入水口和出水口为重点,同时定期(与植株样采集同时进行)或不定期(遇下大雨河水流量大时)共采集了30个入湖河水水样及135个池塘区域水样。植株样分茎叶部与根部,大区试验除试验前与试验后采集植株样品外,在试验过程中定期(每次采收时)或不定期(植株生长有异常时)采集植株样品,采集8个样点混合成一个样品,共采集135个植株样品;微区试验每个培养桶的所有相同部位混合成一个样品。植株样品测量各部位鲜重和干重。

1.4 样品检测方法

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;水中全N采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,水中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)采用纳氏试剂比色法,水中硝态氮($\text{NO}_3^+\text{-N}$)采用紫外分光光度法,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。

1.5 数据统计

空心菜对入湖河水的全N、水溶性N或水溶性P的去除率计算公式如下:

$$W(\%) = (C_0 - C_i) / C_0 \times 100$$

式中:W为全N、水溶性N或水溶性P的去除率; C_0 表示初始浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_i 表示第*i*d时水体中相应元素的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

空心菜对入湖河水的净化水量估算,用单位面积空心菜吸收的N、P养分量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),与入湖河水中

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,其公式如下:

$$M = [(m_1 \times h_1 + m_2 \times h_2) / C] \times 10$$

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为入湖河水的养分含量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;10为单位换算系数。

采用Microsoft Excel 2003进行数据处理,用SPSS 12.0统计软件进行数据*t*检验分析。

2 结果与分析

2.1 入湖河水养分浓度变化对空心菜生长的影响

浮床空心菜的生物产出主要是同化吸收入湖河水中的N、P、K等养分,入湖河水中养分变化会直接影响空心菜的生物产出。由于池水为上一年贮存水且水层浅(30 cm左右),4月27日采样检测,养分浓度较低(表1),空心菜移栽后叶色黄绿、生长缓慢,直到雨季到来,入湖河水流量加大,且河水中养分浓度也较高(5月10日采样检测,全N、水溶性N、水溶性P、水溶性K分别为17.53、16.98、0.83、26.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),5月7日培养池流入河水后,空心菜才叶色发绿、迅速生长。到5月31日时空心菜培养池中的N、P、K含量仍较高(表1),空心菜仍保持快速的长势;6月1日第一次采收后分枝量迅速加大,长势旺盛,根深叶茂,生物量明显提高。7月27日采集水样检测N、P、K养分,其含量显著下降,到8月1日空心菜叶色变为黄绿色;8月2日加入河水后,叶色转绿,并保持根系与茎叶的旺盛生长。这说明空心菜的生物产出与入湖河水中N、P、K养分的含量呈正相关。

2.2 空心菜的生物产出量

对四年来多个池塘漂浮种植的空心菜鲜重产量进行统计,结果见表2。空心菜的生物产出较高,且以茎叶为主(90.9%),茎叶鲜重产量平均达112 032.0

表1 流入星云湖河水N、P、K养分含量与空心菜生长的关系

Table 1 Growth of *Ipomoea aquatica* and contents of N, P and K in river water

采样时间	培养池水养分含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						培养池中空心菜长势、长相
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^+\text{-N}$	水溶性N	全N	水溶性P	水溶性K	
04/27	0.97±0.04	2.48±0.02	3.44±0.06	3.85±0.05	0.11±0.03	11.33±0.13	4月27日移栽,栽苗后至5月9日前生长缓慢、叶色发黄
05/31	0.97±0.08	5.57±1.49	6.54±1.42	6.89±1.49	0.28±0.09	20.78±1.63	5月7日流入过湿地的河水后,植株迅速生长、叶色深绿
07/27	0.39±0.06	0.12±0.02	0.51±0.07	0.95±0.14	0.08±0.01	5.65±0.20	7月27日前植株生长旺盛、叶色深绿,8月1日叶色发黄

注:水溶性N即无机N,为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 之和,下同。

Note: Water-soluble nitrogen included $\text{NO}_3^+\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$. The same below.

表 2 2010—2013 年度入湖河水种植空心菜的养分含量及产量

Table 2 Nutrient contents and productivity of *Ipomoea aquatica* grown in floating-beds on river water flowing to the Xingyun Lake during 2010 and 2013

部位	项目	养分含量/(%) (干基)			产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	
		全 N	全 P	全 K	鲜基	干基
茎叶	平均数	3.190	0.467	4.811	112 032.0	10 209.0
	标准差	0.405	0.024	0.552	1 423.5	155.3
	最大值	3.729	0.500	5.760	146 946.0	13 990.5
	最小值	2.604	0.447	4.319	90 052.5	8 128.5
	平均数	2.011	0.290	3.479	11 173.5	1 128.0
根系	标准差	0.253	0.015	0.432	156.5	19.0
	最大值	2.350	0.312	4.226	13 960.5	1 468.5
	最小值	1.646	0.277	3.109	8 554.5	853.5
	平均数合计				123 205.5	11 337.0

注:产量为水面种植率为 40% 的数据。

Note: Productivity of *Ipomoea aquatica* was estimated by 40% plant-grown area of water surface.

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (折干重为 $10\ 209.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), 而根系的生物产出(9.1%)则远低于茎叶, 仅为 $11\ 173.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (折干重为 $1\ 128.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。

2.3 空心菜对入湖河水的养分吸收量

根据单位面积每年空心菜的生物产量及其养分含量(表 2)进行计算, 空心菜每年吸收入湖河水的 N、P、K 量平均分别为 348.4 、 50.9 、 $530.4\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图 2); 茎叶吸收的养分总量为 $864.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 占总吸收量($929.7\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)的 93.0%; 而根系对河水养分的吸收量很少, 仅为 $65.2\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 说明空心菜茎叶对入湖河水养分的吸收贮存能力较强。

2.4 空心菜对入湖河水养分的去除率

当空心菜第三次割剪后苗长至 10 cm 左右时, 截断池塘的入水口, 用入湖河水静态培养空心菜 20 d 时, 出水口或培养池中水体的全 N、水溶性 N、水溶性 P、水溶性 K 含量均大幅降低。这主要是由于水体被空心菜吸收净化, 被吸收的量(去除率)分别达到了 92.7%、95.9%、90.6%、72.0%(表 3)。

利用入湖河水在培养桶内静态培养空心菜 8 d 后, 全 N、水溶性 N、水溶性 P、水溶性 K 也均大幅降

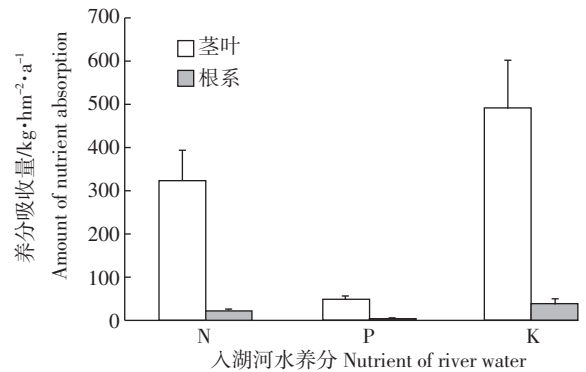


图 2 2010—2013 年度入湖河水种植的空心菜不同部位养分吸收量

Figure 2 Amount of nutrients in different parts of *Ipomoea aquatica* grown in floating-beds on river water flowing to Xingyun Lake during 2010 and 2013

低, 其被空心菜吸收去除的比例分别为 92.2%、91.4%、98.8%、97.2%(表 4)。

当入湖河水与漂浮种植池保持连续进水连续出水的动态培养条件时, 三年的试验培养结果表明, 出水口或培养池中水体的全 N、水溶性 N 及水溶性 P 含量均比入水口河水的量显著下降, 去除率达 50% 左右(表 5)。

无论静态或动态条件下, 空心菜对入湖河水的水溶性 N、P 均具有较高的去除率(表 3、表 4、表 5), 说明了空心菜对水中 N、P 养分的吸收力较强, 吸收量较大, 可有效降低入湖河水中的 N、P 养分含量, 对净化入湖河水水质具有明显效果。经过空心菜对水质的净化后, 入湖河水的水质获得较大改善, 全 N、水溶性 N、水溶性 P 的含量在静态条件下分别低于 1.3 、 1.3 、 $0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 3、表 4), 动态条件下则分别低于 7.4 、 6.9 、 $0.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 5)。

2.5 空心菜对入湖河水的净化效果

根据对周官河入湖河水的水溶性 N、水溶性 P 的 32 次监测结果(平均分别为 12.75 、 $0.754\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 结合单位面积空心菜每年的平均产量(按水面种植率 40%)及其 N、P 的最大和最小含量(表 2)对入湖河水净化量进行估算。结果表明空心菜可净化的入湖河水

表 3 2010 年度空心菜对入湖河水 N、P、K 养分的静态(大区试验)去除率

Table 3 Removal rates of N, P and K by *Ipomoea aquatica* from static river water flowing to Xingyun Lake in 2010 (Macro-Plot Trials)

项目	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水溶性 N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	全 N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水溶性 P/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水溶性 K/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
周官河入湖水	6.22 ± 2.59	6.20 ± 1.82	12.42 ± 2.82	13.07 ± 2.97	0.801 ± 0.248	20.19 ± 3.99
空心菜种植池排出水	0.39 ± 0.06	0.12 ± 0.02	0.51 ± 0.07	0.95 ± 0.14	0.075 ± 0.009	5.65 ± 0.20
平均去除率/%	93.7	98.1	95.9	92.7	90.6	72.0

表 4 2011 年度空心菜对入湖河水 N、P、K 养分的静态(微区试验)去除率

Table 4 Removal rates of N,P and K by *Ipomoea aquatica* from static river water flowing to Xingyun Lake in 2011 (Micro-Plot Trials)

项目	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	水溶性 N/mg·L ⁻¹	全 N/mg·L ⁻¹	水溶性 P/mg·L ⁻¹	水溶性 K/mg·L ⁻¹
入湖河水(种植前)	4.93±0.12	9.91±0.51	14.84±0.51	16.61±1.11	0.434±0.035	20.32±1.12
空心菜种植 8 d 后	0.18±0.09	1.09±0.06	1.27±0.13	1.30±0.13	0.005±0.002	0.57±0.24
平均去除率/%	96.3	89.0	91.4	92.2	98.8	97.2

表 5 2011—2013 年空心菜对入湖河水 N、P、K 养分的动态去除率

Table 5 Removal rates of N,P and K by *Ipomoea aquatica* in dynamic river water flowing to Xingyun Lake during 2011 and 2013

项目	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	水溶性 N/mg·L ⁻¹	全 N/mg·L ⁻¹	水溶性 P/mg·L ⁻¹	水溶性 K/mg·L ⁻¹
周官河入湖水	5.23±2.92	9.35±5.22	14.58±6.75	15.31±7.16	0.819±0.231	18.85±3.11
空心菜种植池排水	1.86±1.48	4.95±2.71	6.81±3.29	7.31±3.51	0.435±0.251	15.10±2.28
平均去除率/%	64.4	47.1	53.3	52.3	46.9	19.9
t 值	2.691	2.023	2.207	2.135	2.002	0.745

注: $t_{0.05(\infty)}=1.960$, $t_{0.01(\infty)}=2.576$ 。

Note: $t_{0.05(\infty)}=1.960$ and $t_{0.01(\infty)}=2.576$.

量,以水溶性 N 计为 22 306~31 937 m³·hm⁻²·a⁻¹,平均为 27 321 m³·hm⁻²·a⁻¹;以水溶性 P 计为 64 667~72 367 m³·hm⁻²·a⁻¹,平均为 67 569 m³·hm⁻²·a⁻¹。

3 讨论

以往关于空心菜净化水体的研究报道都属于静态小试试验^[13-18],如果扩大面积,多种环境因素对植物吸收 N、P 都可能造成影响^[15],本研究采用静态现场大区试验、静态微区试验、动态大面积取样调查(3 年间 30 次采集 135 个漂浮种植池水样及 30 个入湖河水样)等方法,能够比较真实客观地反映出空心菜对入湖河水 N、P 吸收及其生物产出的科学性。

本研究中,按照 40%漂浮种植率计算,空心菜每年的茎叶产量达到了 90 052.5~146 946.0 kg·hm⁻²,平均为 112 032.0 kg·hm⁻²(表 2),明显高于陈家长等^[4]的研究结果(69 618.0~73 161.6 kg·hm⁻²)和余建文^[19]的报道(60 000 kg·hm⁻²),说明本研究中空心菜的茎叶生物产出量较高。由于入湖河水中较高的水溶性 N、水溶性 P 及水溶性 K(表 3)能满足空心菜的正常生长需要,不需要施用任何肥料而节省了种植成本,按每千克平均单价 1.5 元计算,总产值达到了 168 048.0 元·hm⁻²·a⁻¹,经济效益明显。

许多研究^[12,14-17]表明,在众多浮床植物类型中,空心菜是比较理想的材料,主要是由于其根系发达和生物量大,能够很好地吸收去除富营养化水体中的 N、P 养分,去除率一般大于 90%,明显高于水蓼(*Polygonum hydropiper*)、美人蕉(*Canna indica*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、水芹菜等其他水生植物的净化能力(去除

率一般为 36.2%~87.1%)。本研究中,空心菜在静态条件下对入湖河水 N、P 具有较好的去除净化效果,平均去除率高达 90%以上(表 3、表 4),与其他的研究报道^[15-16](同样为静态条件)结果一致。此外,空心菜在动态条件下对入湖河水 N、P 也具有很好的吸收净化效果,平均去除率达 50%左右(表 5)。静态和动态条件下,空心菜对入湖河水 N、P 都表现出了较好的吸收效果,具有较高的养分吸收量(图 2)和净化量。而且,空心菜是一次栽种可多次收割的蔬菜,可以将吸收的养分和污染物移出水体,不会因茎叶腐烂而对水体造成二次污染^[20]。由此说明空心菜是比较适合星云湖池塘生态浮床上种植的水生植物。经过空心菜的吸收净化后,入湖河水水质得到了较大改善(表 3、表 4、表 5),尤其是静态条件下,入湖河水经空心菜吸收 20 d 后,全 N、水溶性 P 含量由平均 13.07、0.80 mg·L⁻¹分别降至 0.95、0.075 mg·L⁻¹(表 3),N、P 含量达到地表水环境质量Ⅱ至Ⅲ类标准(《地表水环境质量标准》GB3838-2002)。这对于保护星云湖水体生态系统具有重要的意义。

有研究^[21]表明,浮床植物吸收水体中 N、P 养分,大部分(40.32%~63.87%)被同化累积在植物组织中,生物量与植物体内 N、P 积累量具有很好的相关性,植物对 N、P 的去除作用可以直接通过生物量来评价^[4,22]。在本研究中,空心菜吸收入湖河水中的 N、P 后转移并绝大部分贮存于茎叶中(表 2),茎叶是空心菜的主要生物产出量,且茎叶的生物量较大(鲜重产量平均达 112 032.0 kg·hm⁻²·a⁻¹)。空心菜的茎叶通过多次收获而源源不断地将 N、P 等养分移出水体^[20],

表明空心菜的茎叶可以很好地去除入湖河水中的N、P等养分。这与空心菜茎叶对入湖河水养分(N、P、K)有很高吸收量($860.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,图2)的结果是一致的。从“水体养分-植物组织养分-植物生物产出(生物量)”的角度所作的分析,也充分说明了空心菜对入湖河水具有较强的净化效果。

近两年来,星云湖沿岸水域种植生长了大面积的水葫芦,尽管水葫芦在生长过程中吸收了较多的N、P等营养物质,但因其利用价值低,难于形成产品,一直未被开发利用,当进入秋冬季后,由于受低温的影响,水葫芦植株会停止生长甚至死亡腐烂,对星云湖水体造成明显的次生污染。本研究利用入星云湖河水种植的空心菜,不仅能大量吸收水体中的N、P等营养物质,而且还能形成蔬菜产品,满足市场需求,具有显著的生态效益和明显的经济效益。因此,可以将星云湖沿岸池塘漂浮种植空心菜技术延伸到星云湖湖面开展相关探索研究,以期实现空心菜逐步替代当前湖面种植的水葫芦,无疑对星云湖水质改善、水资源开发利用和保护具有重要的意义。

4 结论

(1)静态条件下空心菜对入湖河水全N、水溶性P的去除率高达90%以上,动态条件下则达50%左右;空心菜吸收入湖河水N、P、K的量分别平均为 348.4 、 50.9 、 $530.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,且绝大部分被空心菜的茎叶吸收(占93.0%,为 $864.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。空心菜对入湖河水的净化量,以水溶性N计平均为 $27\ 321 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,以水溶性P计平均为 $67\ 569 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,生态效益显著。

(2)漂浮空心菜的生长主要依赖于入湖河水的N、P等营养物质,通过大量吸收并同化水中的养分,空心菜茎叶鲜重产量高达 $90\ 052.5 \sim 146\ 946.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均为 $112\ 032.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,经济效益明显,对星云湖水质改善、水资源保护和利用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张文,吕伟,李海涛.星云湖水质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.
- [2] 张忠祥,官鹏,黄桂香.星云湖网箱养鲤高产高效技术总结[J].水利渔业,2000,20(4):33-34.
- [3] 程素珍,许尚杰,刁汇文,等.水库网箱养鱼对水质的影响及防治对策[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):30-31.
- [4] 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.
- [5] 郭沛涌,朱荫湄,宋祥甫,等.陆生植物黑麦草(*Lolium multiflorum*)对富营养化水体修复的围隔实验研究:氮氮的净化效应及其动态过程[J].浙江大学学报(理学版),2007,34(1):76-79.
- [6] 张志勇,冯明雷,杨林章.浮床植物净化生活污水中N、P的效果及 N_2O 的排放[J].生态学报,2007,27(10):4333-4341.
- [7] 宋祥甫,邹国燕,吴伟明,等.浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究[J].环境科学学报,1998,18(5):489-494.
- [8] 葛滢,常杰,王晓月,等.两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系[J].生态学报,2000,20(6):1050-1055.
- [9] 李芳柏,吴启堂.漂浮栽培美人蕉、蕹菜等植物处理化粪池废水[J].农村生态环境,1997,13(1):25-28,41.
- [10] 邝旭文,陈家长.浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J].湛江海洋大学学报,2001,21(3):29-33.
- [11] 周小平,王建国,薛利红,等.浮床植物系统对富营养化水体中氮、

- 磷净化特征的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2199-2203.
- ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, XUE Li-hong, et al. N and P removal characters of eutrophic water body under planted float[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2199-2203.
- [12] 卜发平, 罗固源, 许晓毅, 等. 美人蕉和菖蒲生态浮床净化微污染源水的比较[J]. 中国给水排水, 2010, 26(3): 14-17.
- BU Fa-ping, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, et al. *Canna indica* and *Acorus calamus* ecological floating beds for purification of micro-polluted source water[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(3): 14-17.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 Agri Sci Bull*, 2008, 14(19): 111-112.
- [19] 余建文. 空心菜生产与发展概况[J]. 科协论坛, 2010, 4: 76-77.
- YU Jian-wen. Overview of production and development of *Ipomoea aquatica*[J]. *Science & Technology Association Forum*, 2010, 4: 76-77.
- [20] 李欲如, 操家顺, 徐峰, 等. 水蕹菜对苏州重污染水体净化功能的研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(1): 69-71.
- LI Yu-ru, CAO Jia-shun, XU Feng, et al. Purification of heavily polluted water bodies in Suzhou by *Ipomoea aquatica*[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2006, 28(1): 69-71.
- [21] 周小平, 徐晓峰, 王建国, 等. 3种植物浮床对冬季富营养化水体氮磷的去除效果研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 102-104.
- ZHOU Xiao-ping, XU Xiao-feng, WANG Jian-guo, et al. Nitrogen and phosphorus removal performance by three planted floats in eutrophic water bodies in winter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 102-104.
- [22] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 轻度富营养化水人工湿地处理系统中植物的特性[J]. 浙江大学学报(理学版), 2005, 32(3): 309-313, 319.
- JIANG Yue-ping, GE Ying, YUE Chun-lei, et al. Characteristics of plants in constructed wetland treating light eutrophic water[J]. *Journal of Zhejiang University(Science Edition)*, 2005, 32(3): 309-313, 319.