

陈灿, 汤伟, 黄璜, 等. 茭虾共作对土壤氮磷含量和茭白干物质积累及氮磷钾吸收分配的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(3): 203-213.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.03.021

茭虾共作对土壤氮磷含量和茭白干物质积累 及氮磷钾吸收分配的影响

陈灿^{1,2}, 汤伟¹, 黄璜^{1,2}, 任勃³, 周天送¹, 吴良洁¹, 王忍¹

1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 湖南省稻田生态种养工程技术研究中心, 长沙 410128;
3. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128

摘要 为探究茭白种养模式的施肥策略, 设置茭虾共作(ZC)、茭白单作(Z) 2个处理, 研究茭虾共作对土壤氮磷含量、茭白产量和茭白干物质积累及氮磷钾吸收分配的影响。2021—2022年的研究结果显示, 茭虾共作模式较茭白单作模式采茭期土壤中全氮、全磷、速效磷的含量分别提高了10.85%~38.89%、5.45%~13.79%、6.19%~61.79%, 净茭产量提高了5.10%~19.54%, 采茭期茭白茎、叶、净茭的干物质积累量分别增加14.41%~16.58%、10.28%~15.15%、10.57%~21.45%。2021年茭虾共作处理较茭白单作处理在采茭期叶的氮含量显著增加了25.74%, 但在孕茭期茎中磷含量显著减少了16.76%; 2022年氮肥减量、减量投喂下, 茭虾共作处理较茭白单作处理在孕茭期茎的氮含量显著减少了23.75%, 在分蘖期叶中磷含量显著减少了12.08%, 2 a全生育期同一器官的钾含量在2个处理间差异不显著。对于养分积累, 2021年茭虾共作处理在分蘖期叶的氮、磷、钾积累量较茭白单作处理分别减少26.04%、27.27%、30.11%, 但在采茭期茎的氮、钾积累量和叶的氮、磷积累量较茭白单作处理分别增加18.80%、38.41%和44.77%、35.71%; 2022年在氮肥减量、饲料减量投喂下, 茭虾共作处理在采茭期叶的磷积累量和茎的钾积累量较茭白单作处理显著增加30.0%和30.77%。关于养分分配, 2种处理的茭白在孕茭期和采茭期氮素的分配均以茎、叶为主, 而磷、钾元素的分配均以茎为主, 茎分配比例在42%~66%。对于养分转运, 2021年2种处理茭白的根、茎、叶在氮、磷转运上大多表现为“库”器官, 而在钾转运上大多表现为“源”器官; 2022年氮肥减量、减量投喂下, 茭白的根、茎、叶在氮、磷、钾转运量上大多表现为“源”器官。因此, 在茭虾共作模式中适当减少肥料、饲料的投入, 能促进形成合理的源库关系, 有利于茭白产量的形成。

关键词 茭白; 小龙虾; 土壤氮; 土壤磷; 干物质; 养分积累

中图分类号 S181; S645.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)03-0203-11

生态循环农业是一种综合运用自然生态科学、社会经济学和其他农业相关的科学原理的新发展模式^[1], 能有效促进农业绿色发展。茭白(*Zizania latifolia* Turcz)是一种禾本科菰属多年生浅水宿根草本植物^[2], 也是南方常见的水生蔬菜。茭白生态种养是顺应循环农业发展大势的一种重要的农业生产模式。茭虾共作模式中, 茭白田为小龙虾提供生长需要的水域空间、遮阳环境和杂草, 同时水生昆虫和有机碎屑等可作为天然饵料, 而小龙虾可为茭白田去除杂草、减少虫害、疏松土壤、增加土壤肥力等^[3]。茭鸭共作模式能显著提高茭白中蛋白质、维生素C及氨基酸的含量, 该模式下的人工湿地还能有效地去

除养鱼池塘富营养化水中的氮、磷, 而合适的放鸭密度能提高经济效益并减少氮素盈余和损失^[4-6]。

土壤是作物生存的基础, 土壤养分作为影响土壤肥力的重要因素, 能够为作物生长提供氮、磷、钾等必要的物质营养条件^[7]。作物的干物质积累和分配是提高产量的决定因素^[8]。N、P、K作为作物生长发育所必需的三大营养元素, 其吸收、分配和转运是影响作物产量与品质的重要方面^[9-10]。目前, 我国学者对于茭虾共作模式的研究主要集中在生产技术^[11-12]和经济效益^[13]等方面, 对该模式的土壤养分、干物质积累和氮磷钾养分吸收分配的研究鲜有报道。为此, 本研究探讨茭虾共作模式对茭白不同生

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0301003)

陈灿, E-mail: CC973@126.com

通信作者: 黄璜, E-mail: hh863@126.com

育期土壤氮磷含量、产量和干物质积累及N、P、K的吸收分配的影响,研究茭虾共作的施肥策略,以期为茭虾种养模式的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验于2021年6月—2022年7月在湖南省望城区乌山街道试验基地进行。试验田0~20 cm耕层土壤的本底值为:有机质含量28.07 g/kg、全氮含量0.96 g/kg、全磷含量0.49 g/kg、全钾含量6.20 g/kg、碱解氮含量124.6 mg/kg、速效磷含量23.2 mg/kg、速效钾含量70.0 mg/kg。供试茭白品种为双季茭白浙茭7号,供试虾为克氏原螯虾(小龙虾)。

1.2 试验设计

试验设置茭虾共作(*Zizania latifolia* co cropping and crayfish, ZC)、茭白单作(*Zizania latifolia* monoculture, Z)2个处理,共2个大区,每大区面积216 m²,不设重复,每大区重复取样9次。对茭虾共作大区,在茭白移栽前,开挖宽0.5 m、深1 m的环形虾沟。虾沟外侧田埂设置高0.6 m的聚乙烯防逃膜,其中底部有0.2 m埋入泥土中,每隔一段距离用竹竿、木桩等加固。

1.3 田间管理

2021年茭田于6月20日整地施基肥,6月21日移栽茭白,株行距为0.9 m×0.4 m,10月下旬至11月中上旬采收。茭虾共作处理和茭白单作处理所有施肥措施一致,N、P₂O₅、K₂O施用量均分别为297、90、270 kg/hm²。茭白移栽前施用复合肥(15-15-15,养分≥45%)600 kg/hm²,定植后10 d施尿素(含N 46%)150 kg/hm²,栽后20~25 d施尿素300 kg/hm²,50%植株孕茭后施孕茭肥,施用氯化钾(含K₂O 60%)300 kg/hm²。2022年茭田于3月20日施基肥,6月中下旬采收茭白。2022年试验采取氮肥减量,仅施用基肥和孕茭肥(同2021年施肥用量),2个处理茭白施肥措施一致,N、P₂O₅、K₂O施用量均分别为90、90、270 kg/hm²。

ZC处理分别于2021年6月下旬和2022年4月下旬投放体质量9 g的虾苗416.67 kg/hm²。试验期间,根据小龙虾生长情况投喂正大有限公司生产的小龙虾专用饲料,2021年按小龙虾质量的3%~5%进行投喂,2022年按小龙虾质量的1.5%~2.5%进行投喂。饲料含水量为9.87%,饲料的全氮、全磷、全钾

含量分别为36.32、9.32、6.80 g/kg,2021年和2022年ZC处理饲料投喂总量分别为1 815.97 kg/hm²和1 107.74 kg/hm²,折算成N、P、K养分施用量分别为59.45、15.25、11.13 kg/hm²和36.26、9.31、6.79 kg/hm²。于2021年8月中上旬和2022年6月中上旬捕捞全部成虾。

1.4 测定项目及方法

1)土壤氮、磷含量测定。在茭白的分蘖期、孕茭期、采茭期取样,采用5点采样法,用内径20 mm的土钻采集0~20 cm耕层土,自然阴干后混匀研磨,过筛后装入自封袋用于后续测定。全氮、全磷采用浓硫酸消煮-流动分析仪法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用0.05 mol/L HCl-0.025 mol/L (1/2 H₂SO₄)提取-可见分光光度计法测定。

2)茭白产量测定。茭白成熟后,各大区随机选取30根茭白,测定壳茭质量、净茭质量、净茭长和净茭粗。同时,各大区随机选取9个2 m×2 m区域作为测产区,人工采收后测定壳茭、净茭产量。

3)干物质测定。在茭白生长的分蘖期、孕茭期、采茭期,ZC、Z处理各大区随机选取9株完整的茭白。将植株样品根、茎、叶、净茭(不包含叶鞘部分的裸茭白)分开,于105℃下杀青30 min后80℃烘至恒质量,测定干质量。

4)N、P、K含量与养分积累量、养分转运量转运养分的贡献率测定。将上述茭白各器官样品粉碎过筛后,采用H₂SO₄-H₂O₂法进行消化,用荷兰Skalar公司的连续流动分析仪(SAN++)测定茭白植株各器官全氮、全磷含量,用火焰光度计测定茭白植株各器官全钾含量。

养分积累量=干物质积累量×养分含量

养分转运量=孕茭期某一器官养分积累量-采茭期该器官养分积累量

转运养分的贡献率=养分转运量/净茭养分积累量×100%。

1.5 数据分析

试验数据均采用Excel 2010软件进行整理和统计分析,采用SPSS 22.0软件进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤氮磷含量

1)土壤全氮。由表1可见,2021年ZC、Z处理的

土壤全氮含量均表现为减少,2022年 ZC、Z 处理的土壤全氮含量均表现为增加;从孕茭期到采茭期,2021、2022 年 ZC 处理的土壤全氮含量均表现为增

加,2021、2022 年 Z 处理的土壤全氮含量均表现为减少。同时,2021 年 ZC 处理的土壤全氮含量在采茭期显著高于 Z 处理。

表 1 2021—2022 年茭白不同处理土壤全氮、全磷含量

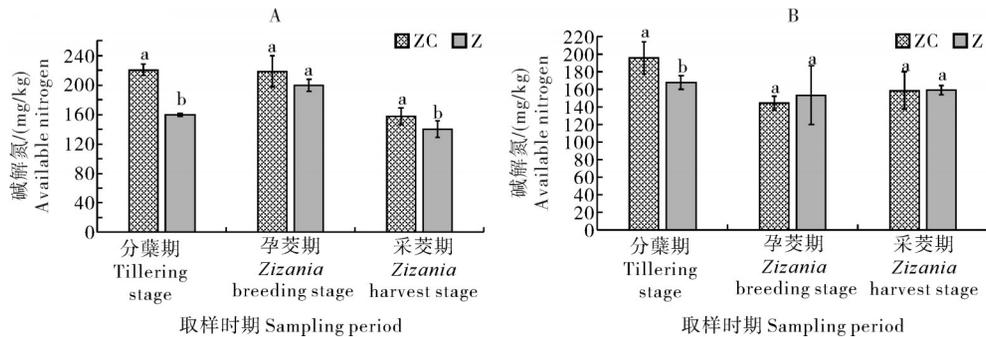
Table 1 Total nitrogen and total phosphorus content of soil under different treatments of *Zizania latifolia* in 2021 and 2022

处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage				孕茭期 <i>Zizania</i> breeding stage				采茭期 <i>Zizania</i> harvest stage			
	全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus		全氮 Total nitrogen		全磷 Total phosphorus	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
茭虾共作 ZC	0.87± 0.32a	1.08± 0.12a	0.61± 0.07a	0.69± 0.04a	0.67± 0.11a	1.23± 0.33a	0.61± 0.04a	0.65± 0.04a	0.75± 0.06a	1.43± 0.24a	0.58± 0.08a	0.66± 0.06a
茭白单作 Z	0.81± 0.11a	1.21± 0.14a	0.55± 0.04a	0.58± 0.02b	0.77± 0.09a	1.4± 0.14a	0.63± 0.05a	0.63± 0.06a	0.54± 0.11b	1.29± 0.25a	0.55± 0.08a	0.58± 0.02b

注:同年同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。Note:Different lowercase letters after the same data in the same year and column indicate significant differences($P<0.05$).

2)土壤全磷。由表 1 可知,全生育期内,2021 年 ZC 处理的土壤全磷含量从分蘖期到孕茭期基本不变,到采茭期减少,2022 年 ZC 处理表现为先减少后增加;2021、2022 年 Z 处理的土壤全磷含量均为先增加后减少。同时,2022 年 ZC 处理的土壤全磷含量在分蘖期和采茭期均显著低于 Z 处理。

3)土壤碱解氮。从图 1 可知,在分蘖期,2021、2022 年 ZC 处理的土壤碱解氮含量均显著高于 Z 处理,增幅分别为 38.30%、16.84%;在孕茭期和采茭期,2021 年 ZC 处理的土壤碱解氮含量均高于 Z 处理,而 2022 年均低于 Z 处理,且 2021 年 ZC 处理的土壤碱解氮含量较 Z 处理显著增加了 12.11%。



不同小写字母表示同一时期的 2 个处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences between the two treatments in the same period ($P<0.05$). The same as below.

图 1 2021(A)和 2022 年(B)不同处理的土壤碱解氮含量

Fig.1 Available nitrogen content of soil under different treatments in 2021(A) and 2022(B)

4)土壤速效磷。由图 2 可知,在分蘖期和采茭期,2021、2022 年 ZC 处理的土壤速效磷含量均高于 Z 处理,且 2021、2022 年 ZC 处理的土壤速效磷含量在分蘖期较 Z 处理分别显著增加了 47.79%、81.01%,2021 年在采茭期显著增加了 61.79%;在孕茭期,2021、2022 年 ZC 处理的土壤速效磷含量均低于 Z 处理,且 2021 年 ZC 处理的土壤速效磷含量较 Z 处理在孕茭期显著减少了 17.91%。

2.2 茭白产量

对茭白产量及产量性状进行分析(表 2),结果显

示,2021 年,与 Z 处理相比,ZC 处理秋季茭白净茭粗显著增加了 10.51%,2 个处理间净茭长、净茭质量、壳茭质量均无显著差异,净茭产量无显著差异,ZC 处理壳茭产量显著增加了 22.55%;2022 年 ZC 处理茭白较 Z 处理的净茭长、净茭粗、净茭质量和净茭产量有所提高但均未产生显著差异,壳茭质量、壳茭产量分别显著提高了 11.64%、8.45%。2021—2022 年 ZC 处理较 Z 处理净茭产量提高了 5.10%~19.54%。

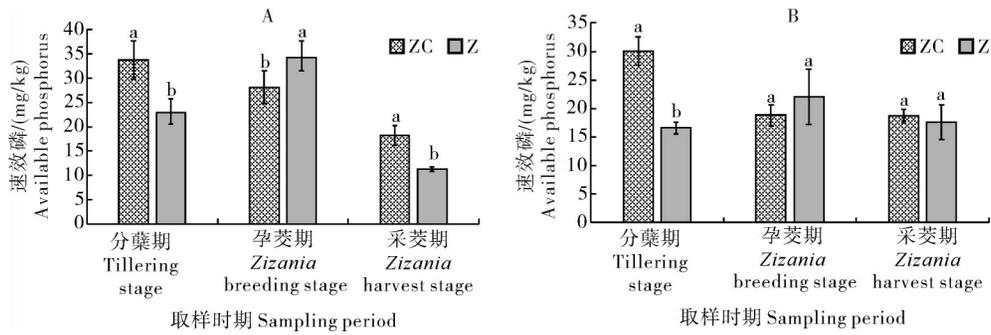


图2 2021(A)和2022年(B)不同处理的土壤速效磷含量

Fig.2 Available phosphorus content of soil under different treatments in 2021(A) and 2022(B)

表2 不同处理茭白产量及其产量性状

Table 2 Yield and yield characteristics of *Zizania latifolia* under different treatments

处理 Treatment	净茭长/cm Length of naked water bamboo		净茭粗/cm Width of naked water bamboo		净茭质量/g Weight of naked water bamboo		壳茭质量/g Weight of water bamboo with leaf sheath		净茭产量/(kg/hm ²) Yield of naked water bamboo		壳茭产量/(kg/hm ²) Yield of water bamboo with leaf sheath	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
茭虾共作 ZC	18.58± 1.77a	18.79± 2.06a	4.52± 0.54a	4.37± 0.21a	110.70± 2.73a	98.43± 6.50a	137.43± 7.31a	125.10± 4.75a	14 650.23± 1 162.69a	20 721.76± 1 368.08a	181 63.67± 1 274.77a	26 336.59± 1 000.24a
	茭白单作 Z	18.40± 1.95a	18.49± 3.30a	4.09± 0.47b	4.03± 0.40a	97.10± 8.08a	90.98± 2.00a	117.82± 11.07a	112.06± 3.63b	12 255.97± 1 676.34a	19 716.46± 434.05a	14 820.94± 1 533.33b

2.3 茭白各器官的干物质积累量

由表3可知,2021、2022年ZC、Z处理茭白的根、茎、叶的干物质积累量从分蘖期到孕茭期均大幅增加,从孕茭期到采茭期的干物质积累量变化较小。2021、2022年茭白根、叶的干物质积累量在2个处理间的全生育期均无显著差异;2021年ZC处理采茭期茎的干物质积累量较Z处理显著增加16.58%,2022年ZC处理分蘖期茎的干物

质积累量较Z处理显著增加36.77%。净茭作为茭白的可食用部位,含水量极高,可达93%及以上,干质量为烘干后的质量,故净茭的干质量较低。2021、2022年ZC处理净茭的干物质积累量均高于Z处理,但2个处理间差异均不显著。2年ZC处理较Z处理采茭期茭白茎、叶、净茭的干物质积累量增加14.41%~16.58%、10.28%~15.15%、10.57%~21.45%。

表3 不同处理下茭白不同生育期各器官的干物质积累量

Table 3 Dry matter accumulation in different organs of *Zizania latifolia* at different growth stages under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	根 Root			茎 Stem			叶 Leaf			净茭 Naked water bamboo
		分蘖期 Tillering stage	孕茭期 <i>Zizania</i> breeding stage	采茭期 <i>Zizania</i> harvest stage	分蘖期 Tillering stage	孕茭期 <i>Zizania</i> breeding stage	采茭期 <i>Zizania</i> harvest stage	分蘖期 Tillering stage	孕茭期 <i>Zizania</i> breeding stage	采茭期 <i>Zizania</i> harvest stage	采茭期 <i>Zizania</i> harvest stage
2021	茭虾共作 ZC	19.05± 8.29a	104.16± 20.71a	84.08± 18.43a	27.01± 6.11a	201.63± 47.36a	215.41± 26.31a	25.97± 5.92a	110.00± 18.54a	130.39± 11.90a	24.74± 9.69a
	茭白单作 Z	20.86± 7.02a	83.80± 27.32a	87.30± 16.15a	29.14± 8.30a	191.25± 24.66a	184.78± 25.11b	32.26± 7.81a	100.78± 19.83a	113.23± 20.34a	20.37± 8.19a
2022	茭虾共作 ZC	34.72± 9.04a	99.72± 10.84a	88.92± 4.77a	38.39± 4.51a	159.62± 25.61a	149.64± 14.12a	40.10± 4.92a	112.10± 10.19a	109.21± 10.73a	29.4± 4.68a
	茭白单作 Z	31.21± 2.47a	89.97± 12.83a	86.33± 10.12a	28.07± 7.75b	159.01± 24.94a	130.79± 18.12a	34.49± 7.81a	100.21± 23.51a	99.03± 13.02a	26.59± 3.72a

2.4 茭白各器官的氮、磷、钾养分含量

从表4可知,除2022年ZC处理孕茭期茭白根的氮含量略高于Z处理外,2021、2022年ZC处理根、茎、叶的氮含量在分蘖期和孕茭期均低于Z处理,且2022年茭虾共作处理较茭白单作处理在孕茭期显著减少了茎的氮含量23.75%;2021、2022年ZC处理根、茎、叶的氮含量在采茭期均高于Z处理,且2021年茭虾共作处理较茭白单作处理在采茭期显著增加了叶的氮含量25.74%。2021、2022年ZC处理茭白净茭的氮含量均高于Z处理,但处理间均无显著差异。

由表4还能看出,2021、2022年茭白根的磷含量在分蘖期和采茭期ZC处理均低于Z处理,2021年ZC处理茭白根的磷含量在孕茭期低于Z处理,2022年则与之相反,2a中2个处理间根的磷含量在全生育期无显著差异。2021、2022年ZC处理茭白茎的磷含量在全生育期均低于Z处理,且2021年ZC处理茭白茎的磷含量在孕茭期较Z处理显著减少了16.76%。2021、2022年茭白叶的磷含量在分蘖期ZC处理均低于Z处理,在采茭期ZC处理均高于Z处理,2021年ZC处理茭白根的磷含量在孕茭期高于Z处理,2022年则与之相反,2022年ZC处理茭白叶的磷含量在分蘖期较Z处理显著减少了12.08%。2021、2022年ZC处理茭白净茭的磷含量均高于Z处理,但处理间均无显著差异。

从表4可得,2021、2022年茭白根的钾含量在采茭期ZC处理均高于Z处理,2021年ZC处理茭白根的钾含量在分蘖期和孕茭期均高于Z处理,2022年则与之相反;2a中茭白茎的钾含量在分蘖期和孕茭期ZC处理均低于Z处理,在采茭期ZC处理均高于Z处理;2021、2022年ZC处理茭白叶的钾含量在分蘖期和采茭期ZC处理均低于Z处理,2021年ZC处理茭白叶的钾含量在孕茭期高于Z处理,2022a则与之相反。2a中ZC处理茭白净茭的钾含量均高于Z处理。2021、2022a全生育期内茭白同一器官的钾含量在处理间均无显著差异。

2.5 茭白各器官的氮、磷、钾养分积累量

由表5可见,2021年,在分蘖期ZC处理茭白茎、叶的氮积累量较Z处理分别显著减少了23.81%、30.11%;在孕茭期ZC处理茭白茎的氮积累量较Z处理显著减少了31.95%;在采茭期ZC处理茭白茎、叶的氮积累量较Z处理分别显著增加了18.8%、44.77%。2022a,ZC、Z处理间茭白同一器官在同一

生育期的氮积累量均无显著差异。2a中ZC处理茭白净茭的氮积累量均高于Z处理,但处理间均无显著差异。

由表5可得,2021年,ZC处理分蘖期茭白叶的磷积累量相比Z处理显著减少了27.27%,但在采茭期较Z处理显著增加了35.71%。2022年,ZC处理采茭期茭白叶的磷积累量相比Z处理显著增加了30%。2a中ZC处理茭白净茭的磷积累量均高于Z处理,但处理间均无显著差异。

由表5还能看出,2021年,在分蘖期ZC处理茭白叶的钾积累量较Z处理显著减少了26.0%,在孕茭期ZC处理茭白根的钾积累量较Z处理显著增加了41.18%,在采茭期ZC处理茭白茎的钾积累量较Z处理显著增加了38.41%。2022年,ZC处理采茭期茭白茎的钾积累量相比Z处理显著增加了30.77%。2a中ZC处理茭白净茭的钾积累量均高于Z处理,但处理间均无显著差异。

2.6 茭白养分的分配与转运

不同生育期,ZC处理和Z处理的养分分配较为相似(表6)。在孕茭期,2021、2022年ZC处理的氮素分配均表现为叶>茎>根,Z处理的氮素分配均表现为茎>叶>根。2021年ZC处理茭白根、叶的氮素分配比例均显著高于Z处理,其茎的氮素分配比例则显著低于Z处理;2022年茭白同一器官的氮素分配比例在2个处理间差异均不显著。关于磷素的分配,2021、2022年ZC、Z处理在孕茭期的磷素分配均表现为茎>叶>根,其中茎的分配比例均超过51%。2021年ZC处理茭白茎的磷素分配比例显著低于Z处理,其叶的磷素分配比例则显著高于Z处理;2022年茭白同一器官的磷素分配比例在2个处理间差异均不显著。孕茭期内,2021、2022年ZC、Z处理的钾素分配均表现为茎>叶>根,且茎的分配比例都大于58%。2021年ZC处理茭白根的钾素分配比例显著低于Z处理,其茎的钾素分配比例则显著高于Z处理;2022年茭白同一器官的钾素分配比例在2个处理间差异均不显著。

在采茭期内,2021、2022年ZC、Z处理氮、磷、钾的分配表现一致,均表现为茎>叶>根>净茭。2021年,ZC处理茭白根的氮素分配比例显著低于Z处理,其叶的氮素分配比例显著高于Z处理;关于磷素分配,ZC处理茭白茎的磷素分配比例显著低于Z处理,其叶的磷素分配比例显著高于Z处理;关于钾素分配,ZC处理茭白茎的钾素分配比例显著高于Z

表4 不同处理下茭白不同生育期各器官的氮、磷、钾含量

年份 Year	养分 Nutrient	处理 Treatment	分蘖期 Tillering stage			孕莖期 <i>Zizania</i> breeding stage			采莖期 <i>Zizania</i> harvest stage			净茭 water bamboo
			根 Root	莖 Stem	叶 Leaf	根 Root	莖 Stem	叶 Leaf	根 Root	莖 Stem	叶 Leaf	
2021	N	ZC	9.85±2.63a	11.82±2.84a	25.18±4.48a	8.49±1.01a	8.15±0.95a	19.27±0.78a	17.85±5.23a	12.92±0.33a	19.10±1.51a	21.45±4.36a
		Z	11.87±0.85a	14.50±1.21a	28.93±1.74a	10.14±1.09a	12.61±3.15a	22.36±1.86a	16.6±3.80a	12.68±2.49a	15.19±0.27b	19.50±2.33a
	P	ZC	2.54±0.79a	4.04±0.57a	3.08±0.32a	1.84±0.18a	3.13±0.17b	2.40±0.09a	2.57±0.22a	3.25±0.32a	2.92±0.46a	3.65±0.26a
		Z	2.74±0.40a	4.48±0.24a	3.31±0.13a	2.15±0.32a	3.76±0.30a	2.39±0.09a	2.62±0.05a	3.74±0.18a	2.44±0.19a	3.53±0.31a
	K	ZC	6.87±1.10a	19.80±1.70a	14.33±1.75a	6.90±0.71a	19.13±1.33a	15.80±0.60a	5.60±0.53a	21.07±1.10a	12.07±0.81a	16.13±1.53a
		Z	6.47±0.83a	20.73±2.19a	15.40±1.44a	6.07±1.22a	20.80±1.39a	15.20±0.40a	5.00±0.87a	17.73±1.81a	13.27±1.8a	14.80±0.28a
2022	N	ZC	8.74±0.97a	12.45±2.21a	22.77±1.36a	8.72±2.47a	13.26±0.47b	23.38±0.93a	16.49±5.23a	13.56±0.33a	17.07±1.54a	20.09±4.36a
		Z	11.72±2.34a	15.07±0.45a	26.28±1.16a	8.59±3.24a	17.39±1.16a	25.84±1.70a	15.24±3.80a	13.32±2.49a	15.49±1.27a	18.13±2.32a
	P	ZC	2.07±0.34a	3.92±0.02a	3.42±0.07b	2.19±0.63a	3.86±0.38a	3.21±0.17a	2.38±0.20a	3.50±0.34a	3.59±0.57a	3.37±0.24a
		Z	2.23±0.54a	4.32±0.50a	3.89±0.10a	1.95±0.19a	4.49±0.64a	3.53±0.37a	2.42±0.05a	4.04±0.19a	3.00±0.23a	3.27±0.29a
	K	ZC	7.01±0.18a	18.81±2.18a	16.94±0.58a	6.11±0.72a	19.36±0.54a	13.55±1.35a	5.71±0.48a	22.75±1.19a	11.23±0.75a	17.09±1.12a
		Z	7.35±0.72a	20.93±1.03a	17.54±0.70a	6.20±0.90a	21.64±1.72a	15.67±0.88a	5.40±0.94a	19.87±2.14a	12.35±1.68a	15.98±0.31a

注: 同年同一养分同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note: ZC represents *Zizania latifolia* co cropping and crayfish mode, Z represents *Zizania latifolia* monoculture mode. Different lowercase letters indicate significant differences after the same nutrient data in the same year and column ($P<0.05$). The same as below.

表5 不同处理下茭白不同生育期各器官的氮、磷、钾养积累量

年份 Year	养分 Nutrient	处理 Treatment	分蘖期 Tilling stage			孕莖期 <i>Zizania</i> breeding stage			采莖期 <i>Zizania</i> harvest stage			净茭 Naked water bamboo
			根 Root	莖 Stem	叶 Leaf	根 Root	莖 Stem	叶 Leaf	根 Root	莖 Stem	叶 Leaf	
2021	N	ZC	0.19±0.08a	0.32±0.07b	0.65±0.15b	0.89±0.18a	1.64±0.39b	2.12±0.36a	1.50±0.33a	2.78±0.34a	2.49±0.23a	0.53±0.21a
		Z	0.25±0.08a	0.42±0.12a	0.93±0.23a	0.85±0.28a	2.41±0.31a	2.25±0.44a	1.45±0.27a	2.34±0.32b	1.72±0.31b	0.40±0.16a
	P	ZC	0.05±0.02a	0.11±0.03a	0.08±0.02b	0.19±0.04a	0.63±0.15a	0.27±0.04a	0.22±0.05a	0.70±0.09a	0.38±0.03a	0.09±0.03a
		Z	0.06±0.02a	0.13±0.04a	0.11±0.03a	0.18±0.06a	0.72±0.09a	0.24±0.05a	0.23±0.04a	0.69±0.09a	0.28±0.05b	0.07±0.03a
	K	ZC	0.13±0.06a	0.53±0.12a	0.37±0.09b	0.72±0.14a	3.86±0.91a	1.74±0.28a	0.47±0.10a	4.54±0.55a	1.57±0.14a	0.40±0.16a
		Z	0.13±0.05a	0.60±0.17a	0.50±0.12a	0.51±0.16b	3.98±0.51a	1.53±0.30a	0.44±0.08a	3.28±0.45b	1.50±0.27a	0.30±0.12a
2022	N	ZC	0.30±0.08a	0.48±0.06a	0.86±0.11a	0.87±0.09a	2.12±0.34a	2.62±0.24a	1.47±0.08a	2.03±0.19a	1.86±0.18a	0.59±0.09a
		Z	0.37±0.03a	0.42±0.12a	0.91±0.21a	0.77±0.11a	2.77±0.43a	2.59±0.61a	1.32±0.15a	1.74±0.24a	1.53±0.20a	0.48±0.07a
	P	ZC	0.07±0.02a	0.15±0.02a	0.14±0.02a	0.22±0.02a	0.62±0.10a	0.36±0.03a	0.21±0.01a	0.52±0.05a	0.39±0.04a	0.10±0.02a
		Z	0.07±0.01a	0.12±0.03a	0.13±0.03a	0.18±0.02a	0.71±0.11a	0.35±0.08a	0.21±0.02a	0.53±0.07a	0.30±0.04b	0.09±0.01a
	K	ZC	0.24±0.06a	0.72±0.08a	0.68±0.08a	0.61±0.07a	3.09±0.50a	1.52±0.14a	0.51±0.03a	3.40±0.32a	1.23±0.12a	0.50±0.08a
		Z	0.23±0.02a	0.59±0.16a	0.60±0.14a	0.56±0.08a	3.44±0.54a	1.57±0.37a	0.47±0.05a	2.60±0.36b	1.22±0.16a	0.43±0.06a

表 6 不同处理下茭白的养分分配与转运
Table 6 Nutrient distribution and transport of *Zizania latifolia* under different treatments

养分 Nutrient	部位 Part	处理 Treatment	养分分配比例/% Proportion of nutrient distribution						转运量/(g/株) Amount of translocation			贡献率/% Contribution rate			
			孕茭期 <i>Zizania</i> breeding stage		采茭期 <i>Zizania</i> harvest stage		2022		2021	2022	2021	2022	2021	2022	
			2021	2022	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022		
N	根 Root	ZC	19.68±4.65a	15.48±0.90a	20.46±3.03b	24.66±1.37a	-0.61±0.18a	-0.60±0.09a	-115.75±33.02a	-101.81±16.02a	-	-	-	-	
		Z	15.13±3.19b	12.86±3.20a	24.91±3.35a	25.93±2.93a	-0.60±0.28a	-0.55±0.11a	-150.82±69.78a	-114.03±22.95a	-	-	-	-	
	茎 Stem	ZC	35.13±5.08b	37.63±4.41a	38.19±2.16a	34.07±2.28a	-1.14±0.39b	0.24±0.22b	-213.71±72.56b	40.19±37.190b	-	-	-	-	
		Z	44.09±4.37a	45.12±4.25a	38.64±2.06a	34.24±3.18a	-0.18±0.08a	0.82±0.26a	-45.19±18.6a	171.21±53.15a	-	-	-	-	
	叶 Leaf	ZC	45.19±3.85a	46.89±5.30a	34.32±2.40a	31.33±2.45a	-0.44±0.30b	0.76±0.24a	-83.59±56.72b	129.03±40.40a	-	-	-	-	
		Z	40.78±2.58b	42.02±5.96a	29.55±2.56b	30.30±4.41a	0.53±0.44a	0.71±0.16a	134.56±111.62a	148.79±32.43a	-	-	-	-	
	净茭 Naked water bamboo	ZC	-	-	7.04±2.61a	9.95±1.67a	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Z	-	-	6.90±2.80a	9.53±1.53a	-	-	-	-	-	-	-	-	
	P	根 Root	ZC	18.37±4.88a	18.28±0.41a	15.53±2.41a	17.24±1.08a	-0.05±0.02a	0.02±0.01a	-58.30±26.18a	21.18±14.58a	-	-	-	-
			Z	15.55±3.54a	14.33±3.34a	18.44±2.68a	18.66±2.26a	-0.06±0.05a	-0.03±0.02a	-86.50±62.57a	-38.53±27.77a	-	-	-	-
茎 Stem		ZC	57.48±5.83b	51.41±4.06a	50.56±2.25b	42.72±2.54a	-0.12±0.13a	0.10±0.10a	-137.86±135.37a	96.83±98.98a	-	-	-	-	
		Z	63.34±4.56a	57.28±3.76a	53.47±2.08a	47.01±3.58a	-0.05±0.02a	0.18±0.11a	-63.90±30.22a	146.01±103.46a	-	-	-	-	
叶 Leaf		ZC	24.15±2.85a	30.31±4.44a	27.62±2.11a	31.94±2.65a	-0.12±0.04b	-0.03±0.03a	-131.66±49.45b	-30.42±32.69a	-	-	-	-	
		Z	21.10±1.85b	28.39±4.97a	22.25±2.03b	26.54±3.98a	-0.06±0.02a	0.09±0.09a	-75.36±24.29a	94.48±99.29a	-	-	-	-	
净茭 Naked water bamboo		ZC	-	-	6.29±2.31a	8.10±1.34a	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Z	-	-	5.84±2.33a	7.79±1.35a	-	-	-	-	-	-	-	-	
K		根 Root	ZC	11.95±3.49a	11.67±0.20a	6.74±1.14a	9.03±0.77a	0.25±0.14a	0.10±0.07a	62.39±36.02a	19.95±13.26a	-	-	-	-
			Z	8.32±2.02b	10.20±2.48a	8.14±1.28a	9.92±1.29a	0.17±0.11a	0.09±0.08a	54.11±36.05a	31.06±1.91a	-	-	-	-
	茎 Stem	ZC	60.58±5.29b	58.99±4.29a	65.07±2.03a	60.27±2.12a	-1.02±0.74b	-0.58±0.24b	-257.62±187.53b	-115.74±47.40b	-	-	-	-	
		Z	66.28±3.83a	61.68±3.86a	58.33±1.64b	54.97±3.82a	0.70±0.51a	0.84±0.54a	231.42±169.33a	195.52±125.52a	-	-	-	-	
	叶 Leaf	ZC	27.48±3.23a	29.34±4.45a	22.68±1.91b	21.79±2.31a	0.33±0.19a	0.29±0.14a	83.15±47.31a	57.70±27.61a	-	-	-	-	
		Z	25.39±2.36a	28.13±4.80a	27.90±2.52a	26.03±3.87a	-0.13±0.10b	0.35±0.37a	-42.41±32.11b	81.42±85.65a	-	-	-	-	
	净茭 Naked water bamboo	ZC	-	-	5.51±2.00a	8.91±1.33a	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Z	-	-	5.64±2.24a	9.08±1.67a	-	-	-	-	-	-	-	-	

注:正值表示养分净输出,负值表示养分净输入。Note:ZC represents *Zizania latifolia* monoculture mode, Z represents *Zizania latifolia* co cropping and crayfish mode, Z represents *Zizania latifolia* monoculture mode. Positive value represents the net nutrient output, negative value represents the net nutrient input.

处理,其叶的钾素分配比例显著低于Z处理。2022年茭白同一器官的同一养分的分配比例在2个处理间差异均不显著。

从表6还可看出,茭白从孕茭期到采茭期,根、茎、叶中大量的氮、磷、钾养分转运至净茭,不同器官对于不同养分的转运量不同。正值表示养分净输出,负值表示养分净输入。2021年ZC处理的氮转运量表现为茎>根>叶,Z处理的氮转运量表现为根>叶>茎,且2个处理间的茎、叶的氮转运量有显著差异。2022年ZC处理的氮转运量表现为叶>根>茎,Z处理的氮转运量表现为茎>叶>根,2个处理间的茎的氮转运量有显著差异。关于磷转运量,2021年ZC处理的茎、叶的磷转运量相近,根的磷转运量最小,而Z处理的根、叶的磷转运量相近,茎的磷转运量最小,且2个处理间的叶的磷转运量有显著差异。2022年ZC、Z处理的磷转运量均表现为茎>叶>根,且2个处理间的同一器官的磷转运量均未产生显著差异。关于钾转运量,2021、2022年ZC处理的钾转运量均表现为茎>叶>根,Z处理的钾转运量均以茎为主,2021年2个处理间的茎、叶的钾转运量有显著差异,而2022年2个处理间的茎的钾转运量有显著差异。2a中ZC、Z处理茭白不同器官的养分贡献率和转运量的表现则基本一致。

3 讨论

3.1 茭虾共作对土壤氮磷含量的影响

土壤养分含量能影响作物的生长发育。厉宝仙等^[14]研究表明,水稻-红螯螯虾共作能增加稻田土壤中的氨态氮、速效磷含量。杨智景等^[15]研究发现,稻虾种养可显著提高稻田和环沟内的土壤全氮含量。本研究结果表明,茭虾共作模式较茭白单作模式在采茭期增加了土壤中全氮、全磷、碱解氮、速效磷的含量。这与前人的研究结果一致。这可能是因为,引入农田的小龙虾作为杂食性动物,取食田间杂草、浮游生物等,减少了对土壤养分的吸收;而饲料、粪便等提高了土壤中的各类养分含量;小龙虾在田间的觅食等活动有利于改善土壤的通透性,加速了土壤养分的转化。

3.2 茭虾共作对茭白产量的影响

茭鸭共作^[4]具有作物增产的效果。本研究发现,茭虾共作处理较茭白单作处理增加了秋、夏2季的净茭产量。而刘少君等^[16]研究发现,稻虾共作对水稻产量无显著影响。这可能与不同作物生长发育所需

的水位深度不同有关。宋世龙^[17]研究发现,稻虾共作模式中随着灌溉水深的提高,水稻产量显著下降。稻田水位一般在10 cm左右,水位过高容易抑制水稻分蘖,减少茎蘖数和地上部干物质质量;而茭白田一般水位在20 cm左右,茭白不易受到水位过高的负面影响,同时茭虾共作模式增加了养分的输入途径和总输入量,促进茭白的生长发育,有利于增加单个茭白质量,从而实现增产。

3.3 茭虾共作对干物质积累的影响

作物产量的形成与干物质的积累和分配的关系十分密切。本研究发现,2021年茭白从孕茭期到采茭期,肉质茎膨大的这段时间内茭虾共作模式茭白的茎、叶干物质积累量仍在增加,且茭虾共作模式显著提高了采茭期茭白茎的干物质积累量;2022年试验氮肥减量、减量投喂下,茭白从孕茭期到采茭期,茭虾共作模式和茭白单作模式茭白茎、叶的干物质积累量均减小,且茭虾共作模式减小幅度更小。这可能是因为茭虾共作模式新引入了小龙虾,残留的饲料、小龙虾在田间的蜕壳和排泄物等增加了养分的来源,同时小龙虾在田间的一系列活动加快了土壤养分的释放^[18],促进了茭白的养分吸收,过多的养分输入使茭白的叶片、短缩茎在向肉质茎转运养分的同时也积累了大量的养分。而在氮肥减量、饲料减量投喂下,茭虾共作模式减少了养分的过量输入,使得茭白茎、叶在肉质茎膨大期将主要养分转运到净茭中,形成合理的源库关系,有利于茭白产量的形成。

3.4 茭虾共作对养分积累的影响

氮、磷、钾作为植物生长发育的三大营养元素,对于碳水化合物、产量的形成至关重要。陈贵等^[18]研究发现,茭白植株地上部各器官的氮、钾含量较高,磷含量相对较低,这与本试验结果一致。另外,本研究中,2种模式根的氮、磷含量主要表现为先减后增,根的钾含量则主要表现为持续下降;茭虾共作模式茎的氮、钾含量总体呈上升趋势,磷含量则总体呈下降趋势,茭白单作模式茎的氮含量总体呈上升趋势,磷、钾含量则总体呈下降趋势;2种模式叶的氮、钾含量主要表现为持续下降,叶的磷含量则主要表现为先减后增。而江解增等^[19]研究发现,茭白植株叶片中的氮、磷、钾含量变化总体表现出下降趋势,与本试验结果存在一定差异,这可能是不同茭白品种的特性不同所导致的。

本研究发现,2021年茭虾共作模式茭白的叶在

分蘖期的氮、磷、钾积累量均显著低于茭白单作模式,而2022年2个处理间茭白的叶在分蘖期的氮、磷、钾积累量无显著差异。这可能是由于虾苗投放时间不同所导致,2021年虾苗投放较早,分蘖期小龙虾取食部分茭白新生长的幼嫩分蘖,直接影响了茭白的生长发育;2022年茭白生长一段时间后再投放的虾苗,故受影响较小。

关于养分分配,本研究发现,茭虾共作模式和茭白单作模式的茭白在孕茭期和采茭期氮素的分配均以茎、叶为主;2个处理茭白植株磷、钾元素的分配均以茎为主,分配比例在42%~66%。这表明从孕茭期到采茭期,茭白的茎是养分分配的中心。转运量的正值表示养分净输出,负值则表示养分净输入。2021年本试验中,从孕茭期到采茭期,除茭白单作模式叶的氮转运量外,茭虾共作模式和茭白单作模式的根、茎、叶的氮、磷转运量均为负值,这表明在茭白肉质茎膨大过程中根、茎、叶在作为氮、磷转运的“源”器官转运养分的同时也在作为“库”器官吸收养分,这可能是由于2021年本试验中肥料施用较多导致。2022年在氮肥减量、饲料减量投喂下,2个处理根的氮转运量均为负值,茎、叶的氮转运量均为正值,这可能是由于氮肥的大量减施导致茭白生长发育的氮素营养不够,茭白加强了根系对土壤氮素的吸收所导致。同时,2a中2个处理的根、茎、叶的钾转运量大多为正值,表明在茭白肉质茎膨大过程中根、茎、叶主要作为钾转运的“源”器官转运养分。

综上所述,茭虾共作模式能提高土壤中全氮、全磷、碱解氮、速效磷的含量,增加茭白的净茭产量和采茭期茭白根、茎、叶、净茭的干物质积累量。茭虾共作模式对茭白不同器官的养分含量和养分积累量的影响各有差异。在养分分配方面,2种模式的茭白在孕茭期和采茭期氮素的分配均以茎、叶为主,而磷、钾元素的分配均以茎为主,茎分配比例在42%~66%。对于养分转运,茭虾共作、茭白单作模式茭白的根、茎、叶在氮、磷转运上大多为表现为“库”器官,而在钾转运上大多表现为“源”器官;氮肥减量、减量投喂下,2个处理茭白的根、茎、叶在氮、磷、钾转运量上大多表现为“源”器官。因此,在茭虾共作模式中适当减少肥料、饲料的投入,能促进形成合理的源库关系,有利茭白产量的形成。

参考文献 References

[1] 宋路平. 乡村振兴战略下生态循环农业发展模式与实践分析[J]. 农业经济, 2022(11): 3-6. SONG L P. Analysis on the de-

velopment model and practice of eco-circular agriculture under the strategy of rural revitalization [J]. Agricultural economy, 2022(11): 3-6 (in Chinese).

- [2] 陈玥, 翁丽青, 郑春龙, 等. 植物生长调节剂对茭白孕茭的作用研究[J]. 植物生理学报, 2018, 54(10): 1605-1614. CHEN Y, WENG L Q, ZHENG C L, et al. Effects of plant growth regulators on galls formation of *Zizania latifolia* [J]. Plant physiology journal, 2018, 54(10): 1605-1614 (in Chinese with English abstract).
- [3] 宋光同, 丁凤琴. 茭白、克氏原螯虾生态共作技术[J]. 科学养鱼, 2011(2): 24-26. SONG G T, DING F Q. Ecological crop technique of wild rice stem and crayfish [J]. Scientific fish farming, 2011(2): 24-26 (in Chinese).
- [4] 王桂良, 朱凌宇, 张家宏, 等. 茭鸭共作对茭白产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(21): 45-52. WANG G L, ZHU L Y, ZHANG J H, et al. Effects of integrated *Zizania latifolia*-duck farming on yield and quality of *Zizania latifolia* [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2017, 33(21): 45-52 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张家宏, 王桂良, 徐荣, 等. 茭鸭共作人工湿地消纳养殖池塘富营养化水的初步研究[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(6): 546-554. ZHANG J H, WANG G L, XU R, et al. Nutrient assimilating effects of *Zizania latifolia*-duck symbiotic artificial wetland on eutrophied water from fishing ponds [J]. Journal of ecology and rural environment, 2017, 33(6): 546-554 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张家宏, 王桂良, 王守红, 等. 茭白-鸭共作系统中氮平衡及经济效益分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5): 498-505. ZHANG J H, WANG G L, WANG S H, et al. Nitrogen balance and economic benefit in *Zizania latifolia*-duck mutual ecosystem [J]. Journal of agricultural resources and environment, 2015, 32(5): 498-505 (in Chinese with English abstract).
- [7] 袁建钰, 李广, 闫丽娟, 等. 黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征[J]. 草业科学, 2020, 37(9): 1803-1812. YUAN J Y, LI G, YAN L J, et al. Soil and plant carbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau [J]. Pratacultural science, 2020, 37(9): 1803-1812 (in Chinese with English abstract).
- [8] 蔡倩, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 909-920. CAI Q, SUN Z X, ZHENG J M, et al. Dry matter accumulation, allocation, yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of western Liaoning Province [J]. Scientia agricultura sinica, 2021, 54(5): 909-920 (in Chinese with English abstract).
- [9] 房增国, 赵秀芬. 胶东地区不同花生品种的养分吸收分配特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 241-250. FANG Z

- G, ZHAO X F. Nutrient absorption and distribution characteristics of different peanut varieties in Jiaodong Peninsula[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2015, 21(1): 241-250 (in Chinese with English abstract).
- [10] 武庆慧, 汪洋, 赵亚南, 等. 氮磷钾配比对潮土区高产夏播花生产量、养分吸收和经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 98-104. WU Q H, WANG Y, ZHAO Y N, et al. Effects of NPK ratio on yield, nutrient absorption and economic benefit of high-yielding summer peanut in a fluvo-aquic soil [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2019(2): 98-104 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张家宏, 毕建花, 朱凌宇, 等. “一茭三虾”生态种养模式绿色生产技术[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(6): 107-110. ZHANG J H, BI J H, ZHU L Y, et al. Green production technology of “one-season water bamboo with three harvests of *Procambarus clarkii*” ecological planting and breeding pattern[J]. Guizhou agricultural sciences, 2018, 46(6): 107-110 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王守红, 张家宏, 寇祥明, 等. 茭白-氏原螯虾共作生产技术规范[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 383-384. WANG S H, ZHANG J H, KOU X M, et al. Technical specification for work and production of *Zizania latifolia*-*Procambarus clarkii* [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2011, 39(6): 383-384 (in Chinese).
- [13] 张家宏, 寇祥明, 韩光明, 等. 里下河地区水生蔬菜+克氏原螯虾共(轮)作关键技术及效益分析[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(10): 1898-1901. ZHANG J H, KOU X M, HAN G M, et al. The key technique and benefit analysis of coculture (rotation) of aquatic vegetables and *Procambarus clarkii* in Jiangsu Lixiahe Area [J]. Hubei agricultural sciences, 2017, 56(10): 1898-1901 (in Chinese with English abstract).
- [14] 房宝仙, 王保君, 怀燕, 等. 水稻-红螯螯虾共作对稻田土壤养分、碳库与稻米品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 688-696. LI B X, WANG B J, HUAI Y, et al. Effects of integrated rice-redclaw crayfish farming system on soil nutrients, carbon pool and rice quality [J]. Acta agriculturae zhejiangensis, 2021, 33(4): 688-696 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨智景, 顾海龙, 顾明, 等. 稻虾种养模式对土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23): 245-249. YANG Z J, GU H I, GU M, et al. Effects of rice-freshwater shrimp (*Macrobrachium nipponense*) culture model on soil fertility [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2020, 48(23): 245-249 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘少君, 李文博, 熊启中, 等. 稻虾共作磷素平衡特征及生态经济效益研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2179-2188. LIU S J, LI W B, XIONG Q Z, et al. Phosphorus balance and eco-economic benefits in the integrated rice-crayfish system [J]. Journal of agro-environment science, 2021, 40(10): 2179-2188 (in Chinese with English abstract).
- [17] 宋世龙. 稻田水深对稻虾共作水稻、克氏原螯虾生长及其关键环境因子影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021. SONG S L. Effects of water depth in paddy field on the growth and key environmental factors of rice and crayfish in rice-crayfish intergrowth [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陈贵, 赵国华, 张红梅, 等. 沼液浇灌对茭白氮磷钾养分吸收利用特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(3): 474-481. CHEN G, ZHAO G H, ZHANG H M, et al. Effect of biogas slurry application on N, P and K uptake and utilization characteristics of *Zizania latifolia* [J]. Acta agriculturae zhejiangensis, 2016, 28(3): 474-481 (in Chinese with English abstract).
- [19] 江解增, 邱届娟, 曹磊生, 等. 茭白地上部氮磷钾及蛋白质含量变化规律的研究[J]. 扬州大学学报, 2003, 24(1): 67-70. JIANG J Z, QIU J J, CAO B S, et al. Studies on changes of contents of n, p, k and protein of different parts in *Zizania latifolia* [J]. Journal of Yangzhou University, 2003, 24(1): 67-70 (in Chinese with English abstract).

Effects of co-cropping *Zizania latifolia* with crayfish on content of nitrogen and phosphorus in soil, accumulation of dry matter and uptake and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in *Zizania latifolia*

CHEN Can^{1,2}, TANG Wei¹, HUANG Huang^{1,2}, REN Bo³, ZHOU Tiansong¹, WU Liangjie¹, WANG Ren¹

1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2. Hunan Paddy Field Ecological Planting and Farming Engineering Technology Research Center, Changsha 410128, China;
3. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

Abstract Two treatments including co-cropping *Zizania latifolia* with crayfish (ZC) and *Zizania latifolia*

ifolia monoculture (Z) were set up to study the effects of co-cropping *Zizania latifolia* with crayfish on the content of nitrogen and phosphorus in soil, the accumulation of dry matter and the uptake and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in *Zizania latifolia* to explore fertilization strategies for the planting and farming mode of *Zizania latifolia*. The results of two years showed that ZC increased the content of total nitrogen, total phosphorus, and available phosphorus in the soil during the harvesting period by 10.85% to 38.89%, 5.45% to 13.79%, and 6.19% to 61.79%, respectively, compared to Z. ZC increased the net *Zizania latifolia* yield by 5.10% to 19.54%. ZC increased the accumulation of dry matter in the stem, leaf, and net *Zizania latifolia* during the harvesting period by 14.41% to 16.58%, 10.28% to 15.15%, and 10.57% to 21.45%, respectively. In 2021, ZC significantly increased the content of nitrogen in leaves by 25.74% compared to Z during the harvesting period of *Zizania latifolia*, but significantly reduced the content of phosphorus in stems by 16.76% during the pregnancy period of *Zizania latifolia*. In 2022, ZC significantly reduced the content of nitrogen in stem by 23.75% during the pregnancy period of *Zizania latifolia* and the content of phosphorus in leaves by 12.08% during the tillering period of *Zizania latifolia* compared to Z under the reduction of nitrogen fertilizer and reduced feeding. There was no significant difference in the content of potassium in the same organ during the entire two-year growth period between the two treatments. For nutrient accumulation, the accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in the leaves of *Zizania latifolia* under ZC in 2021 significantly decreased by 26.04%, 27.27%, and 30.11% compared to Z during the tillering period. However, the accumulation of nitrogen and potassium in the stems and leaves during the harvesting period under ZC significantly increased by 18.80%, 38.41%, 44.77%, and 35.71%, respectively, compared to Z. In 2022, the accumulation of phosphorus in the leaves and accumulation of potassium in the stems of ZC significantly increased by 30.0% and 30.77% compared to Z during the harvesting period under the reduction of nitrogen fertilizer and reduced feeding. For nutrient distribution, the distribution of nitrogen in the two treatments of *Zizania latifolia* during the pregnancy and harvesting period was mainly in the stem and leaves, while the distribution of phosphorus and potassium elements was mainly in the stem, with distribution ratio of 42% to 66% in stem. For nutrient transport, the roots, stems, and leaves of the two treatments of *Zizania latifolia* mostly exhibited “sink” organs in nitrogen and phosphorus transport in 2021, while they mostly exhibited “source” organs in potassium transport. In 2022, the roots, stems, and leaves of *Zizania latifolia* in the two treatments mostly represented “source” organs in nitrogen, phosphorus, and potassium transport under the reduction of nitrogen fertilizer and reduced feeding. It is indicated that reducing the input of fertilizer and feed appropriately in the co-cropping *Zizania latifolia* with crayfish can promote the formation of a reasonable source and sink relationship, which is conducive to the formation of yield.

Keywords *Zizania latifolia*; crayfish; nitrogen in soil; phosphorus in soil; yield; dry matter; nutrient accumulation

(责任编辑: 张志钰)