

长期稻虾共作模式下稻田钾素平衡状况及合理施钾量研究

彭成林^{1, 2}, 袁家富^{1, 3}, 佘国涵^{1*}, 刘威¹, 赵书军¹, 苏章峰⁴, 李金华⁴, 谢媛圆¹, 马朝红¹

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434025; 3. 农业农村部潜江农业环境与耕地保育科学观测试验站, 湖北 潜江 433116; 4. 潜江市农业技术推广中心, 湖北 潜江 433100)

摘要: 通过田间试验, 研究了长期稻虾共作模式和中稻单作模式下农田生态系统钾素的输入、输出特征、平衡状况以及不同施钾量对直播水稻产量和钾肥利用效率的影响。结果表明, 稻虾共作模式钾输入总量为 134.3 kg/hm², 主要由化肥、饲料、降雨及灌溉水等带入, 分别占输入总量的 46.3%、10.3%、5.5% 和 34.8%; 相对于中稻单作模式, 稻虾共作模式由饲料和灌溉水输入的钾大幅增加。稻虾共作模式钾输出总量为 119.4 kg/hm², 主要由水稻籽粒、商品虾、渗漏以及排水带出, 分别占输出总量的 26.5%、5.0%、41.2% 和 27.3%, 相对于中稻单作模式, 以上 4 种途径钾输出均大幅增加。两种模式下钾表观平衡均出现盈余, 且稻虾共作模式系统钾的盈余量低于中稻单作模式。同等施钾量条件下, 长期稻虾共作模式的水稻产量、钾肥偏生产力和钾肥利用率较中稻单作模式分别平均提高了 14.1%、14.2% 和 5.6%, 且水稻增产主要是通过增加有效穗数来实现的。中稻单作模式和稻虾共作模式施钾量分别达到 47.3 kg/hm² (即 K₂O 施用量 57.0 kg/hm²) 和 21.6 kg/hm² (即 K₂O 施用量 26.0 kg/hm²) 时能够维持农田生态系统钾素平衡, 而 K₂O 施用量分别达到 82.2 和 85.0 kg/hm² 时水稻能够获得较高的产量。

关键词: 稻虾共作; 直播水稻; 钾素平衡状况; 施钾量

农业生态系统是人工生态系统, 与无限自然延续的自然生态系统相比, 农业生态系统能够持续不断地发展主要靠人为因素的补给和控制, 因此人为控制下的养分循环是建立可持续发展农业的物质基础^[1-2]。生态系统中营养物质的循环是系统生产力和持久性的决定因素, 对生物圈化学环境有重大影响^[3]。农田生态系统中的养分循环过程受人类活动的影响深刻, 不合理的人类活动可能对农田生态系统造成不利影响^[4]。

稻虾〔水稻 (*Oryza sativa*) - 克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*)〕共作模式是我国长江中下游地区一种新兴的稻田种养复合生态模式, 稻田生态系统中引入克氏原螯虾不仅能够大幅提高水、肥

和能量的利用率, 增强稻田生态系统的稳定性及抵抗外界冲击的能力^[5-6], 而且促进了系统中物质循环, 阻止了稻田物质流的外溢, 使稻田生态系统结构与功能得到改善和提高^[7]。钾是土壤中最丰富的营养元素之一, 作物从土壤中带走的钾长期以来主要靠施用钾肥来补偿, 归还土壤钾量大大低于作物带走量, 因此农田生态系统土壤钾素普遍处于亏缺状态^[8]。增加钾肥施用量、推进秸秆还田是改善农田生态系统钾平衡的有效措施, 它不仅增加了农田生态系统中钾素输入, 而且还可以缓解秸秆焚烧带来的污染环境问题, 使养分资源得以循环利用^[9-11]。由于化学钾肥的增施和秸秆还田的推广, 2010 年全国主要农区的土壤钾素表观平衡相较于 1980 年已经由亏缺向盈余转变^[12]。目前关于稻虾共作生态系统中养分循环特征、平衡状况等方面的研究主要集中在氮素和磷素^[13], 养分管理主要集中在氮素^[14], 而关于稻虾共作模式下农田生态系统中钾素平衡状况和养分管理等方面的研究鲜有报道。为此, 本文通过设置田间试验, 研究长期稻虾共作模式下农田生态系统中钾输入、输出特征, 平衡状况, 以及不同施钾量对直播水稻产量和钾肥利用效率的影响, 为合理调控稻虾共作

收稿日期: 2020-05-13; 录用日期: 2020-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077097); 国家重点研发计划项目 (2017YFD03014002); 湖北省农业科学院重大科技成果培育课题 (2017CGPY01)。

作者简介: 彭成林 (1977-), 男, 湖北松滋人, 副研究员, 硕士, 主要从事农业生态及水稻栽培技术研究。E-mail: chlpeng@163.com。

通讯作者: 佘国涵, E-mail: siguoh@qq.com。

系统钾素平衡, 指导稻田钾素优化管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验点概况

试验点位于湖北省潜江市白鹭湖农场关山分场 (30° 11' 36.07" N、112° 43' 22.68" E), 属江汉平原低湖区, 北亚热带季风湿润气候, 土壤类型为湖积物发育而成的潮土性水稻土。稻虾共作模式 (CR) 每年 10 月至次年 5 月, 田面泡水养虾, 水深 20 ~ 40 cm, 而中稻单作模式 (MR) 冬季田面不泡水, 采取休耕方式, 两种模式每年 6 月至 10 月种植水稻, 此期间水分管理基本一致, 水稻秸秆均全量还田。两种模式的试验地相邻, 其中稻虾共作模式试验地于 2005 年水稻收割后挖虾沟养虾, 2006 年为稻虾共作第 1 年种植水稻, 2018 年分别为连续第 13 年种植水稻。2018 年水稻播种前土壤化学性状见表 1。供试中稻品种为华润 2 号, 系湖北省农业科学院粮食作物研究所和湖南亚华种子有限公司共同选育的常规水稻新品种^[15]。

表 1 试验地土壤化学性状

模式	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
MR	6.75	19.7	97.3	5.21	172.3
CR	6.82	25.2	127.5	5.76	175.6

1.2 试验设计

2018 年针对连续 13 年稻虾共作模式和中稻单作模式各安排一个施钾量试验, K_2O 施用量设 6 个水平, 分别为 0.0、45.0、75.0、105.0、135.0、165.0 kg/hm², P_2O_5 施用量均为 52.5 kg/hm², 氮施用量均为 105 kg/hm²。采用随机区组设计, 每处理设 3 次重复, 小区面积 25 m²。各小区间做土埂, 区组间留 40 cm 宽的水沟, 方便灌排水和农事操作。

另外, 针对连续 13 年稻虾共作模式和中稻单作模式各安排一个钾素平衡试验, 面积分别为 0.68 和 0.49 hm²。

所有处理均于 6 月 4 日播种, 播种量折算成干谷为 60 kg/hm², 人工撒直播, 10 月 9 日收割。

稻虾共作模式和中稻单作模式农田系统边界见图 1。

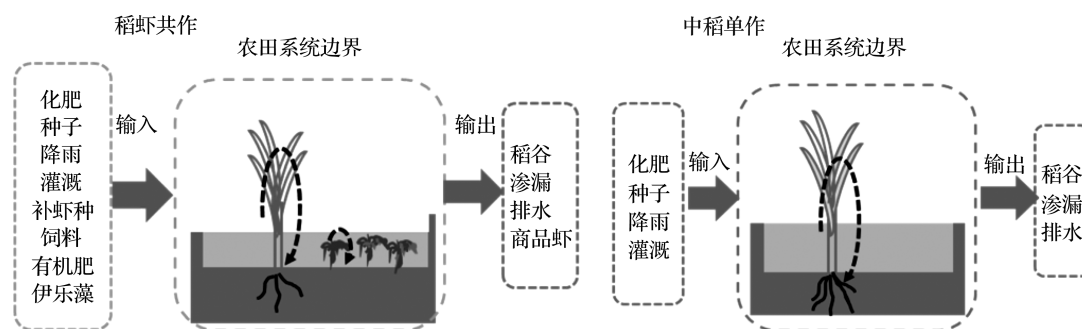


图 1 稻虾共作模式和中稻单作模式农田系统边界

1.3 样品采集及测定指标

(1) 土壤样品 依据 S 形 5 点采样法于水稻整地前采集 0 ~ 20 cm 土层土样, 采集土样去除植物残根和石块并混匀, 风干过筛, 分析土壤的 pH 值及有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量。

(2) 降雨水样 试验地点放置一台雨量计, 记录每次降雨的雨量, >5 mm 以上降雨时, 取降雨水样, 分析水样中水溶性钾。

(3) 灌溉水样 记录每次灌水发生的时间, 估算每个模式的灌水量 (根据灌水深度估算), 同时取灌水水样, 分析水样中水溶性钾。

(4) 排水水样 记录每次排水发生的时间, 估

算每个模式的排水量, 同时取排水水样, 分析水样中水溶性钾。

(5) 克氏原螯虾饲料及克氏原螯虾样品 每天详细记录成虾出售重量, 计算整年度成虾产出总量, 详细记载幼虾投入量。2018 年 4 月 6 日和 5 月 15 日分别取幼虾、成虾、饲料样, 进行含水量和全钾含量分析。

(6) 植株样品 成熟期, 取各小区有代表性稻株 0.25 m², 剪去根后茎叶和穗 3 部分烘干并粉碎, 测定地上部分各器官的全钾含量。2018 年 10 月 8 日, 随机抽取约 50 根伊乐藻鲜样, 烘干并粉碎后测定全钾含量。

(7) 有机肥 于施肥前, 随机取有机肥样品 1 kg, 烘干后测定其全钾含量。

1.4 样品分析测定方法与参数计算

(1) 参数计算 钾肥偏生产力 (kg/kg) = 施钾区产量 / K_2O 施用量; 钾肥农学效率 (kg/kg) = (施钾区产量 - 无钾区产量) / K_2O 施用量; 钾肥表观利用率 (%) = (施钾区作物吸 K_2O 量 - 无钾区作物吸 K_2O 量) / K_2O 施用量 $\times 100$; 钾肥贡献率 (%) = (施钾区产量 - 无钾区产量) / 施钾区产量 $\times 100$; 农田钾素表观平衡 = 钾输入总量 - 钾输出总量。

(2) 钾含量测定方法 土壤 pH 采用土: 水 = 1 : 5 酸度计法, 土壤有机质采用重铬酸钾容量法, 土壤碱解氮采用碱解扩散法, 有效磷采用 Olsen 法, 速效钾用中性乙酸铵浸提 - 火焰光度法测定。饲料样品、克氏原螯虾样品、植株样品中全钾含量采用硫酸 - 双氧水消化, 火焰分光光度法测定。水样中水溶性钾含量经过滤后, 采用火焰分光光度法测定。

(3) 水稻产量及其构成因素测定方法 于水稻成熟期, 各处理取 0.25 m^2 样方水稻用于考种, 测定有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量; 各小区全部实收测产。

(4) 水稻推荐施肥量模型选择 采用二次型拟合施肥量与水稻产量之间的关系, 二次型模型函数式为 $y = b_0 + b_1x + b_2x^2$, 式中 y 为水稻产量 (kg/hm^2), x 为 K_2O 施用量 (kg/hm^2), b_0 、 b_1 和 b_2 分别为基础产量 (不施肥时产量)、线性系数和二次方系数。

1.5 数据统计分析

试验数据采用 DPS 2000 软件的单因素 LSD 检验法进行方差分析; 用 Excel 2010 进行其他数据的处理和计算。

2 结果与分析

2.1 两种模式农田生态系统钾平衡状况

由表 2 可知, 中稻单作模式钾输入总量为 82.9 kg/hm^2 , 主要由化肥、降雨及灌溉水带入, 分别占输入总量的 75.0%、8.9% 和 15.7%, 这说明除施肥外, 降雨和灌溉对钾输入也起了重要作用。中稻单作模式钾输出总量为 42.3 kg/hm^2 , 主要由收获的水稻籽粒、渗漏和排水输出, 分别占输出总量的 37.1%、36.4% 和 26.5%。稻虾共作模式由于克氏

表 2 中稻单作模式和稻虾共作模式钾平衡状况

项目		MR	CR
输入钾 (kg/hm^2)	化肥	62.2	62.2
	水稻种子	0.3	0.3
	降雨	7.4	7.4
	灌溉水	13.0	46.7
	补虾种	—	0.2
	饲料	—	13.9
	有机肥	—	2.3
输出钾 (kg/hm^2)	伊乐藻	—	1.3
	合计	82.9	134.3
	水稻籽粒	15.7	31.6
	渗漏	15.4	49.2
	排水	11.2	32.6
	商品虾	—	6.0
	合计	42.3	119.4
输出 / 输入		0.51	0.89
钾表观平衡 (kg/hm^2)		40.6	14.9
推荐最低施钾量 (kg/hm^2)		21.6	47.3

注: ①稻虾共作模式投入专用饲料 1070.0 kg/hm^2 、大豆 215.0 kg/hm^2 , 专用饲料和大豆 (表中合并为饲料) 带入的钾总量为 13.9 kg/hm^2 。②稻虾共作模式养虾季需要栽种伊乐藻 225.0 kg/hm^2 , 带入的钾为 1.3 kg/hm^2 。③稻虾共作模式有机肥投入 1275 kg/hm^2 , 带入的钾为 2.3 kg/hm^2 。④中稻单作模式稻季灌溉水体积为 $7800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌溉水带入的钾为 13.0 kg/hm^2 ; 稻虾共作模式稻季灌溉水体积均为 $9900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 养虾季灌溉水体积均为 $15000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 合计带入钾总量为 46.7 kg/hm^2 ; 中稻单作模式排水总体积均为 $2000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 排水输出的钾为 11.2 kg/hm^2 ; 稻虾共作模式在水稻季排水体积均为 $2300 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 养虾季排出的养殖废水体积为 $5800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 水稻季和养虾季排水合计输出钾总量为 32.6 kg/hm^2 。⑤中稻单作模式和稻虾共作模式化肥钾的输入量均为 62.2 kg/hm^2 。⑥水稻直播用种量均为 67.5 kg/hm^2 , 通过种子输入的钾均为 0.3 kg/hm^2 。⑦全周期降雨量为 1359.1 mm , 两种模式通过降雨输入的钾均为 7.4 kg/hm^2 。⑧稻虾共作成虾产量为 945 kg/hm^2 , 虾苗产量为 1755 kg/hm^2 , 成虾和虾苗 (表中合并为商品虾) 合计输出钾总量为 6.0 kg/hm^2 。⑨中稻单作和稻虾共作模式水稻籽粒产量分别为 6859 和 7993 kg/hm^2 , 输出的钾分别为 15.7 和 31.6 kg/hm^2 。⑩中稻单作模式钾的渗漏损失量参考谢建昌等^[16]在我国南方冲积稻区水田上的测定值 15.4 kg/hm^2 , 稻虾共作模式灌水量是中稻单作模式的 3.19 倍, 钾的渗漏损失量根据中稻单作模式钾的渗漏损失量乘以 3.19 倍计算所得。

原螯虾的引入使得整个系统具有次级生产, 系统的钾输入与输出也随之发生改变。稻虾共作模式钾输入总量为 134.3 kg/hm^2 , 主要由化肥、饲料、降雨及灌溉水带入, 分别占输入总量的 46.3%、10.3%、5.5% 和 34.8%, 相对于中稻单作模式, 输入总量增

加了 62.0%，其中饲料和灌溉水输入钾的量大幅增加。稻虾共作模式钾输出总量为 119.4 kg/hm²，主要由水稻籽粒、商品虾、渗漏和排水输出，分别占输出总量的 26.5%、5.0%、41.2% 和 27.3%，相对于中稻单作模式，输出总量增加了 182.2%，4 种途径输出钾的量均大幅增加。

稻虾共作模式中钾的输出 / 输入高于中稻单作模式，且均小于 1；两种模式农田系统钾表观平衡均出现盈余，且稻虾共作模式农田系统钾的盈余量低于中稻单作模式。稻虾共作模式和中稻单作模式施钾量分别达到 47.3 kg/hm²（即 K₂O 施用量 57.0 kg/hm²）和 21.6 kg/hm²（即 K₂O 施用量 26.0 kg/hm²）时能够维持农田生态系统钾素平衡。

2.2 两种模式施钾量对水稻产量和钾肥利用效率的影响

试验结果（表 3）表明，对于中稻单作模式，随着施钾量的增加，水稻产量总体表现出先增加后下降趋势，K₂O 施用量 105.0 kg/hm² 时，水稻产量最高；对于稻虾共作模式，当 K₂O 施用量达到 45.0 kg/hm² 及以上时，产量变化不明显。在两种模式下，钾肥偏生产力均随施钾量的增加而显著下降。当 K₂O 施用量 45.0 kg/hm² 时水稻的钾肥偏生产力、钾肥农学效率和钾肥利用率均表现最高。在同等施钾量条件下，长期稻虾共作模式的水稻产量、钾肥偏生产力和钾肥利用率较中稻单作模式水稻分别平均提高 14.1%、14.2% 和 5.6%。可见，长期稻虾共作模式相对于中稻单作模式能较大幅度提高水稻产量、钾肥偏生产力和钾肥利用率。

表 3 两种模式下施钾量对水稻产量和钾肥利用效率的影响

模式	K ₂ O 施用量 (kg/hm ²)	实测产量 (kg/hm ²)	钾肥偏生产力 (kg/kg)	钾肥农学效率 (kg/kg)	钾肥利用率 (%)	钾肥贡献率 (%)
MR	0.0	6591b	—	—	—	—
	45.0	6870ab	152.7a	6.2a	54.2a	4.0a
	75.0	6859ab	91.4b	2.4a	32.5bc	3.7a
	105.0	7181a	68.4c	5.1a	36.8b	8.1a
	135.0	6934ab	51.4d	2.6a	16.6c	4.9a
	165.0	6892ab	41.8e	1.8a	19.6c	4.2a
CR	0.0	7453b	—	—	—	—
	45.0	7969a	177.1a	11.5a	49.5a	6.4a
	75.0	7993a	106.6b	6.1ab	33.5ab	6.7a
	105.0	7856a	74.8c	3.7b	33.1ab	5.1a
	135.0	7886a	58.4d	3.3b	33.8ab	5.4a
	165.0	7966a	48.3e	3.1b	21.6b	6.4a

注：同模式、同列内不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.3 两种模式施钾量对水稻产量构成因子的影响

从表 4 可以看出，中稻单作模式各处理理论产量以不施钾表现最低，以 K₂O 施用量 105.0 kg/hm² 处理最高。连续 13 年稻虾共作模式下，理论产量仍以不施钾表现最低，但各处理之间差异均不显著。两种模式下，结实率和千粒质量总体上以不施钾处理表现最低，与部分施钾处理之间的差异达到显著水平。对比两种模式下水稻理论产量和产量构成因子可知，相同施钾量的条件下，稻虾共作模式水稻理论产量、有效穗数、结实率和千粒质量均高

于单作模式，其中理论产量平均增加 18.3%，有效穗数平均增加 20.0%，结实率平均增加 1.2%，千粒质量平均增加 3.5%。可见，相对中稻单作模式，长期稻虾共作模式主要是通过增加有效穗数来实现增产。

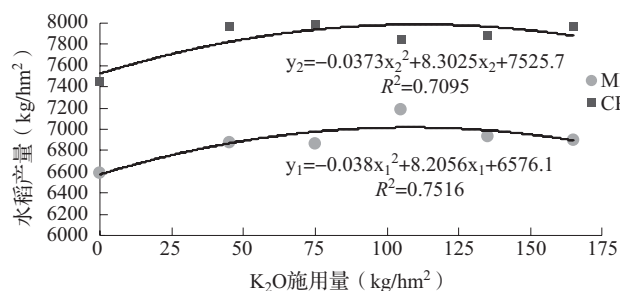
2.4 两种模式施钾量与产量之间的关系

由图 2 可以看出，对于中稻单作模式，水稻产量（y₁）与 K₂O 施用量（x₁）的关系用二次方程 $y_1 = -0.038x_1^2 + 8.2056x_1 + 6576.1$ 来确定；对于稻虾共作模式，水稻产量（y₂）与 K₂O 施用量（x₂）的关

表 4 两种模式下施钾量对水稻产量构成因素的影响

模式	施 K ₂ O 量 (kg/hm ²)	理论产量 (kg/hm ²)	有效穗数 (穗/m ²)	每穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒质量 (g)
MR	0.0	6409b	310.7a	114.0abc	79.8d	22.7b
	45.0	6747ab	305.3a	116.3ab	82.6c	23.0ab
	75.0	6567b	308.0a	109.8abc	84.8abc	22.9ab
	105.0	6982a	310.7a	116.6a	83.6bc	23.1ab
	135.0	6759ab	312.0a	109.0bc	85.9a	23.1a
	165.0	6651ab	313.3a	106.8c	85.6ab	23.2a
CR	0.0	7051a	313.3a	115.5a	84.7c	23.0c
	45.0	7212a	313.3a	114.3a	86.6a	23.3ab
	75.0	7195a	324.0a	110.6a	85.8abc	23.4a
	105.0	7148a	316.0a	112.5a	86.6a	23.2ab
	135.0	7402a	314.7a	118.5a	85.0bc	23.4a
	165.0	7416a	326.7a	114.0a	86.0ab	23.2b

系用二次方程 $y_2 = -0.0373x_2^2 + 8.3025x_2 + 7525.7$ 来确定。根据拟合方程, 计算出中稻单作模式和稻虾共作模式的最高产量 K₂O 施用量分别为 108.0 和 111.3 kg/hm², 以 K₂O 的价格 6.00 元/kg, 水稻收购价格 2.72 元/kg (优质稻, 订单收购价格) 计算, 得出中稻单作模式和稻虾共作模式 K₂O 经济施用量分别为 82.2 和 85.0 kg/hm²。

图 2 两种模式 K₂O 施用量与产量之间的二次型函数模型

3 讨论

3.1 钾平衡参数的选择

对于农田系统中钾平衡的研究, 不同的研究者采用的钾输入输出参数略有不同。夏颖等^[9]将施肥、降雨、灌溉和秸秆还田作为钾输入参数, 作物收获和地表径流作为输出参数, 研究了湖北省 6 种主要种植制度下农田生态系统中钾的输入、输出数量特征和平衡状况, 但未考虑渗漏损失。张玉铭

等^[17]将施肥和秸秆还田作为钾输入参数, 作物收获作为输出参数, 研究了华北太行山前平原农田生态系统的钾素平衡状况, 但未考虑降雨、灌溉输入的养分和地表径流输出的养分。罗良国等^[18]通过施肥、灌溉、降雨及秧苗输入养分与作物收获、渗漏输出养分之差计算了 5 种不同模式水稻田生态系统养分平衡状况, 但未考虑秸秆还田输入的养分。本研究参考以上研究以及倡国涵等^[13]针对稻虾共作模式氮和磷循环特征及平衡状况研究时所采用的输入、输出参数, 将化肥、种子、降雨、灌溉、补虾种、饲料、有机肥、伊乐藻作为稻虾共作模式钾输入参数, 将化肥、种子、降雨、灌溉作为中稻单作模式钾输入参数, 将稻谷、渗漏、排水、商品虾作为稻虾共作模式钾输出参数, 将稻谷、渗漏、排水作为中稻单作模式钾输出参数。

3.2 秸秆还田对农田生态系统钾平衡的影响

王宏庭等^[19]认为, 增施钾肥和秸秆还田是保持土壤钾素肥力的重要措施。秸秆还田可减缓土壤钾素耗竭, 钾肥和秸秆还田结合则可使土壤钾素平衡处于盈余状况。夏颖等^[9]研究了湖北省 6 种主要种植制度下农田生态系统中钾的输入、输出数量特征和平衡状况, 认为通过秸秆输出的钾量达到了 186.3 kg/hm², 占作物带走量的 89.1%, 但秸秆归还的钾量只占秸秆总量的 16.2%, 这表明农田生态系统中的钾大部分被秸秆带走, 秸秆还田的潜力巨

大,推进秸秆还田是改善湖北省农田生态系统钾平衡的有效措施;在油菜-水稻模式中,两季秸秆还田的比例均为50%,农田钾盈亏量为 -58.6 kg/hm^2 ,推荐施钾量为 181.5 kg/hm^2 ;在中稻单作模式,秸秆还田的比例为30%,农田钾盈亏量为 -46.6 kg/hm^2 ,推荐施钾量为 177.4 kg/hm^2 。本研究的两种模式秸秆均为全量还田,秸秆中的钾进入了系统内循环,在输入输出参数中则不予考虑,但秸秆全量还田减少了钾输出,改善了农田生态系统钾平衡状况,钾表观平衡均出现盈余,因此维持系统平衡所需的施钾量大大低于夏颖等^[9]推荐的湖北省油-稻模式以及中稻单作模式施钾量。

3.3 长期稻虾共作模式对土壤肥力及水稻产量的影响

土壤基础肥力是影响作物产量的重要因素^[20]。郑盛华等^[21]认为水稻基础肥力贡献率随基础肥力升高而升高。在稻虾共作模式下,由于水稻秸秆的持续全量还田、水草的种植、饲料残饵、小龙虾的蜕壳及排泄物、水稻水肥管理措施等综合因素均影响了土壤肥力。相关研究结果表明,相对于中稻单作,稻虾共作模式改善了土壤结构,增加了土壤养分,水稻产量显著提高^[22-23],且主要是通过增加有效穗数来实现的^[14],这与本研究的结果基本一致。钾是作物正常生长必不可少的肥料三要素之一,其吸收、积累、转移和分配对水稻生产和产量形成至关重要^[24]。王强盛等^[25]研究表明,在一定钾肥施用量范围内,水稻产量随施钾量的增加呈先增加后下降的趋势。鲁艳红等^[26]5年定位研究的结果表明,当 K_2O 施用量在 156 kg/hm^2 范围内时,早稻平均产量随施钾量增加而增加;当 K_2O 施用量高于 156 kg/hm^2 时,早稻平均产量随施钾量增加而降低。在施钾量与产量的关系方面,本项研究也表现出类似的结果,但不同的是合理施钾量相对前人的研究结果大幅下降,这进一步证明了长期稻虾共作模式下秸秆全量还田对稻田钾素平衡产生了持续影响。

4 结论

长期稻虾共作模式钾输入总量为 134.3 kg/hm^2 ,主要由化肥、饲料、降雨及灌溉水带入,分别占输入总量的46.3%、10.3%、5.5%和34.8%;相对于中稻单作模式,稻虾共作模式饲料和灌溉水输入钾量大幅增加。稻虾共作模式钾输出总量为 119.4 kg/

hm^2 ,主要是水稻籽粒、成虾、渗漏和径流带出,分别占输出总量的26.5%、5.0%、41.2%和27.3%,相对于中稻单作模式,以上4种途径钾输出量均大幅增加。两种模式农田系统钾表观平衡均出现盈余,且稻虾共作模式系统钾的盈余量低于中稻单作模式。稻虾共作模式和中稻单作模式施钾量分别达到 47.3 kg/hm^2 (即 K_2O 施用量 57.0 kg/hm^2)和 21.6 kg/hm^2 (即 K_2O 施用量 26.0 kg/hm^2)时能够维持农田生态系统钾素平衡。

在同等施钾量条件下,长期稻虾共作模式的水稻产量、钾肥偏生产力及钾肥利用率较中稻单作模式水稻产量分别平均提高14.1%、14.2%和5.6%。在不同施钾水平下,长期稻虾共作模式主要是通过增加有效穗数来实现增产的。中稻单作模式和稻虾共作模式 K_2O 施用量分别达到82.2和85.0 kg/hm^2 能获得较高的产量。

参考文献:

- [1] 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中,等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 145-151.
- [2] 时正元,鲁如坤. 农田养分再循环研究 I. 作物秸秆养分的利用率[J]. 土壤, 1993(6): 281-285.
- [3] 曹湊贵,张光远,王运华. 农业生态系统养分循环研究概况[J]. 生态学杂志, 1998(4): 26-32.
- [4] 傅庆林,俞劲炎,王兆骞. 易旱农田生态系统养分循环的研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(2): 146-149.
- [5] 程慧俊. 克氏原螯虾稻田养殖生态学的初步研究[D]. 武汉: 湖北大学图书馆, 2014. 7-10.
- [6] 曹湊贵,江洋,汪金平,等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1245-1253.
- [7] 奚业文,周洵. 稻虾连作共作稻田生态系统中物质循环和效益初步研究[J]. 中国水产, 2016(3): 78-82.
- [8] 唐旭,计小江,李超英,等. 水稻-大麦长期轮作体系钾肥效率及土壤钾素平衡[J]. 中国农业科学, 2014, 47(1): 90-99.
- [9] 夏颖,刘冬碧,张富林,等. 湖北省主要种植制度农田生态系统钾平衡状况[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2395-2401.
- [10] 王振忠,董百舒,吴敬民. 太湖稻麦地区秸秆还田增产及培肥效果[J]. 安徽农业科学, 2002, 30(2): 269-271.
- [11] 徐国伟. 种植方式、秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量与品质的影响及其生理的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.
- [12] Liu Y X, Yang J Y, He W T, et al. Provincial potassium balance of farmland in China between 1980 and 2010[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 107(2): 247-

- 264.
- [13] 倡国涵, 袁家富, 彭成林, 等. 稻虾共作模式氮和磷循环特征及平衡状况 [J]. 中国生态农业学报, 2019, 27 (9): 1309-1318.
- [14] 彭成林, 袁家富, 贾平安, 等. 长期稻虾共作模式对不同施氮量下直播水稻产量和氮肥利用效率的影响 [J]. 河南农业科学, 2020, 49 (4): 15-21.
- [15] 李进波, 陈遵东, 夏明元, 等. 优质高产水稻新品种华润2号的选育 [J]. 中国稻米, 2015 (5): 88, 90.
- [16] 谢建昌, 周健民, Hardter R. 钾与中国农业 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2000. 10-25.
- [17] 张玉铭, 胡春胜, 毛任钊, 等. 华北太行山前平原农田生态系统中氮、磷、钾循环与平衡研究 [J]. 应用生态学报, 2003 (11): 1863-1867.
- [18] 罗良国, 闻大中, 沈善敏. 北方稻田生态系统养分平衡研究 [J]. 应用生态学报, 1999 (3): 46-49.
- [19] 王宏庭, 金继运, 王斌, 等. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (4): 801-808.
- [20] 张军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响 [J]. 作物学报, 2011, 37 (11): 2020-2029.
- [21] 郑盛华, 陈红琳, 朱孟琦, 等. 水稻产量对川西平原基础肥力和施肥的响应 [J]. 中国农业大学学报, 2018, 23 (12): 13-20.
- [22] 倡国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (1): 61-68.
- [23] 吴本丽, 陈贵生, 赵慧敏, 等. 巢湖地区稻虾共作模式对稻田土壤肥力的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45 (1): 96-100.
- [24] 黄绍文, 金继运, 王泽良, 等. 北方主要土壤钾形态及其植物有效性研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (2): 156-164.
- [25] 王强盛, 甄若宏, 丁艳锋, 等. 钾对不同类型水稻氮素吸收利用的影响 [J]. 作物学报, 2009, 35 (4): 704-710.
- [26] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 五年定位试验钾肥用量对双季稻产量和施钾效应的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (3): 598-605.

Study of potassium balance and potassium application rate in long-term integrated rice-crayfish mode

PENG Cheng-lin^{1, 2}, YUAN Jia-fu^{1, 3}, SI Guo-han^{1*}, LIU Wei¹, ZHAO Shu-jun¹, SU Zhang-feng⁴, LI Jin-hua⁴, XIE Yuan-yuan¹, MA Chao-hong¹ (1. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizers, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan Hubei 430064; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025; 3. Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qianjiang Hubei 433116; 4. Qianjiang Agro-Technology Extension Center, Qianjiang Hubei 433100)

Abstract: Through field experiments, the effects of the long-term integrated rice-crayfish mode and the rice monoculture mode on potassium (K) input and output characteristics, balance status, and different K application rates on the yield of direct-seeded rice and potash fertilizer use efficiency were studied. The results showed that the K input of the integrated rice-crayfish mode was 134.3 kg/hm², which were mainly brought by chemical fertilizer, fodder, rainfall and irrigation water, accounting for 46.3%, 10.3%, 5.5% and 34.8% of the total input, respectively. Compared with the rice monoculture mode, the K input of fodder and irrigation water of the integrated rice-crayfish mode increased greatly. The total K output of the integrated rice-crayfish mode was 119.4 kg/hm², mainly including rice grain, commercial shrimp, leakage and runoff, accounting for 26.5%, 5.0%, 41.2% and 27.3% of the total output, respectively. Compared with the rice monoculture mode, the K output of the above four ways increased significantly. The apparent balance of K in the two modes was surplus, and the surplus of K in the integrated rice-crayfish mode was lower than that in the rice monoculture mode. Under the same K application rate, the rice yield, K partial productivity and K utilization rate of the integrated rice-crayfish mode were 14.1%, 14.2% and 5.6% higher than that of the rice monoculture mode respectively. Compared with the rice monoculture mode, the long-term integrated rice-crayfish mode could increase the yield mainly by increasing the number of effective panicles. In a word, when the K application rate of the integrated the rice monoculture mode and rice-crayfish mode of rice and shrimp reach 47.3 kg/hm² (K₂O application 57.0 kg/hm²) and 21.6 kg/hm² (K₂O application 26.0 kg/hm²), respectively, the K balance of farmland ecosystem could be maintained; when the K₂O application amount reach 82.2 and 85.0 kg/hm² respectively, higher yield could be gotten.

Key words: integrated rice-crayfish mode; direct seeding rice; potassium balance; potassium application rate