

长期施肥对双季稻区水稻植株养分积累与转运的影响

唐海明, 肖小平, 李超, 程凯凯, 汪柯, 孙耿, 张帆, 潘孝晨

湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125

摘要: 长期施肥是影响稻田土壤理化特性, 进而影响水稻 (*Oryza sativa* L.) 生长发育的重要农艺措施。研究不同施肥模式对双季稻区水稻植株干物质和养分积累与分配的影响, 对于选择养分高效利用施肥模式具有重要的实际意义。以湖南宁乡长期大田定位试验为平台, 应用常规实验分析方法系统分析了定位长达 31 年化肥 (MF)、秸秆还田+化肥 (RF)、30%有机肥+化肥 (LOM)、60%有机肥+化肥 (HOM) 和无肥对照 (CK) 5 种施肥处理对水稻各部位干物质和氮、磷、钾积累与分配的影响。结果表明, 早稻和晚稻成熟期, 各施肥处理水稻植株各部位的干物质积累量、茎和叶物质转运率及茎叶物质贡献率均高于 CK 处理; 植株抽穗后物质同化贡献率均高于 CK 处理, 其大小顺序表现为 RF>HOM>LOM>MF>CK。早稻成熟期, HOM 处理茎、叶、穗和地上部分氮、磷和钾素积累量均显著高于 MF 和 CK 处理 ($P<0.05$), 其中氮素积累量分别比 CK 处理增加了 11.61、14.38、45.20 和 71.19 kg·hm⁻²; 磷素积累量分别比 CK 处理增加了 2.42、1.64、13.83 和 17.89 kg·hm⁻²; 钾素积累量分别比 CK 处理增加了 35.34、9.78、15.12 和 60.24 kg·hm⁻²。晚稻成熟期, RF 处理茎、叶氮素积累量均显著高于 LOM 和 CK 处理 ($P<0.05$), 分别比 CK 处理增加了 6.91 kg·hm⁻² 和 9.38 kg·hm⁻²; HOM 处理茎、叶、穗和地上部分的磷和钾素积累量均显著高于 MF、RF、LOM 和 CK 处理 ($P<0.05$), 磷素积累量分别比 CK 处理增加了 2.55、1.39、10.56 和 14.50 kg·hm⁻²; 钾素积累量分别比 CK 处理增加了 43.84、7.35、7.77 和 58.96 kg·hm⁻²。总体而言, 长期施肥均增加了水稻各部位干物质和养分积累并促进养分向穗部转运, 其中以秸秆还田、有机肥配施化肥措施最有利于提高水稻群体干物质和养分积累与转运。

关键词: 水稻; 施肥模式; 干物质; 积累; 转运

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.03.010

中图分类号: S147.2; X17

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2018) 03-0469-09

引用格式: 唐海明, 肖小平, 李超, 程凯凯, 汪柯, 孙耿, 张帆, 潘孝晨. 2018. 长期施肥对双季稻区水稻植株养分积累与转运的影响[J]. 生态环境学报, 27(3): 469-477.

TANG Haiming, XIAO Xiaoping, LI Chao, CHENG Kaikai, WANG Ke, SUN Gen, ZHANG Fan, PAN Xiaochen. 2018. Effects of different long-term fertilization managements on nutrition accumulation and translocation of rice plant in double cropping paddy field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(3): 469-477.

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是中国最重要的粮食作物之一, 水稻种植面积和产量对国家粮食生产安全具有重要的战略意义 (张小莉等, 2009)。水稻产量受较多因素的影响, 其中施肥是影响水稻产量的关键因素之一。近年来, 随着农业生产要素和施肥习惯的改变, 越来越多的农业生产者逐渐减少有机肥的投入、加大了化肥的施用量。施肥结构的改变对农业生产和农田生态环境造成了诸多影响, 许多研究者对此开展了相应的研究 (Gao et al., 2002; Roelck et al., 2004; 张娟琴等, 2017)。前人研究认为, 有机-无机肥配施有利于充分发挥所施用肥料的优点, 改善稻田生态环境, 促进植株生长发育, 提高水稻干物质累积, 有利于水稻获得高产 (张文锋等, 2016)。

前人就不同施肥模式对稻田土壤理化特性、微

生物多样性、温室气体排放、作物生长发育、植株理化特性、营养特性、水稻产量等方面开展了大量的研究。徐明岗等 (2006) 研究认为, 施用有机肥或有机肥配施化肥能显著提高土壤活性有机质含量和碳库管理指数。李凯等 (2010) 研究结果表明, 长期有机-无机肥配合施用促进了土壤大团聚体形成, 增加了土壤固碳能力。邵兴华等 (2012) 研究认为, 长期有机-无机肥配合施用, 可显著提高稻田土壤肥力, 增强土壤酶活性, 有利于提高土壤生产力。谭周进等 (2004) 研究结果表明, 合理轮作、施用有机肥均有利于提高稻田土壤肥力和增强土壤酶活性。郝晓晖等 (2010) 研究认为, 施用有机肥有利于提高稻田土壤微生物的碳源利用率和微生物群落功能多样性。Tang et al. (2016) 研究结果表明, 施用有机肥增加了稻田甲烷和氧化亚氮温室

基金项目: 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503123); 湖南省自然科学基金项目 (2017JJ1018); 国家自然科学基金项目 (31571591)

作者简介: 唐海明 (1980 年生), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事耕作生态和农作制度研究。E-mail: tanghaiming66@163.com

收稿日期: 2017-12-05

气体的排放量和综合温室效应。张奇春等(2005)研究发现,水稻产量与水稻吸收氮、磷、钾总量均呈显著正相关关系。陈敏等(2014)研究结果表明,小调整配方处理(施肥量为 $N\ 150\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 120\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 105\ kg\cdot hm^{-2}$)水稻植株对磷、钾的吸收总量均高于常规施肥处理。李娟等(2011)研究认为,在农民习惯施氮水平上减施氮肥增加了水稻植株各生育期的株高、分蘖数、叶片 SPAD 值与总生物量,提高了植株的有效穗数、结实率、千粒重和水稻产量。郑盛华等(2017)研究结果表明,施肥处理有利于促进水稻提早分蘖,增加水稻分蘖数,提高水稻产量。前人研究结果表明,在各试验区域不同的管理措施下施肥方式对土壤理化特性、水稻生长发育、植株理化和营养特性、产量等均具有明显的影响,施用有机肥有利于培肥土壤、改善水稻生长特性,从而提高水稻产量。

南方双季稻区是中国主要的粮食主产区,其粮食种植面积和产量对保障国家粮食生产安全具有十分重要的现实意义。前人已在该区域开展了不同施肥模式对双季稻田土壤养分、温室气体排放、水稻生物学和理化特性、产量等方面的影响研究(邵兴华等,2012;谭周进等,2004;郝晓晖等,2010;Tang et al.,2016;李文军等,2015;唐海明等,2015;徐一兰等,2015)。不同施肥模式对水稻生物学特性影响方面的研究结果表明,有机-无机肥配施有利于协调水稻个体群体生长及促进群体生长率(姜佰文等,2013;彭耀林等,2004),提高植株干物质积累量和产量(唐海明等,2015;徐一兰等,2015),然而在长期定位施肥条件下如何确保稻田生态环境、改善双季稻植株养分积累与转运特性的系统研究较少。为了探明长期施肥下双季稻植株养分积累与转运变化特征,本研究以连续 31 年长期大田肥料定位试验田为基础,开展在长期定位施肥后双季稻植株各部位干物质积累和养分转运特征的研究,以期对南方双季稻区养分高效利用选择最佳的施肥模式提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

不同施肥模式定位试验始于 1986 年,在湖南省宁乡县农技中心($112^{\circ}18'E$, $28^{\circ}07'N$)内进行。该地区为典型的双季稻主产区,海拔 36.1 m,年均气温 $16.8\ ^{\circ}C$,年平均降雨量 $1\ 553.70\ mm$,年蒸发量 $1\ 353.9\ mm$,无霜期 274 d。试验地土壤为水稻土,河沙泥土种植,种植制度为大麦(*Hordium vulgare* L.)-双季稻,肥力中等,排灌条件良好。1986 年试验前耕层土壤(0~20 cm)基础肥力:有机质 $29.39\ g\cdot kg^{-1}$ 、全氮 $2.01\ g\cdot kg^{-1}$ 、全磷 $0.59\ g\cdot kg^{-1}$ 、

全钾 $20.6\ g\cdot kg^{-1}$ 、碱解氮 $144.1\ mg\cdot kg^{-1}$ 、有效磷 $12.87\ mg\cdot kg^{-1}$ 、速效钾 $33.0\ mg\cdot kg^{-1}$ 和 pH 值 6.85。

1.2 试验设计及田间管理

试验设 5 个施肥处理:(1)化肥处理:施氮、磷、钾化肥,不施任何有机肥(MF: mineral fertilizer alone);(2)秸秆还田+化肥处理:施用稻草秸秆与化肥处理(RF: rice residues and mineral fertilizer);(3)30%有机肥+化肥处理:有机肥的氮含量占总施氮量的 30%,其余 70%为化肥氮(LOM: 30% organic matter and 70% mineral fertilizer);(4)60%有机肥+化肥处理:有机肥的氮含量占总施氮量的 60%,其余 40%为化肥氮(HOM: 60% organic matter and 40% mineral fertilizer);(5)无肥对照:不施任何肥料(CK: without fertilizer input)。每个小区长 10.00 m,宽 6.67 m,面积 $66.7\ m^2$,小区间用水泥埂隔开,埋深 100 cm,高出田面 35 cm。保证各小区独立,不串灌串排。

早稻供试品种为湘早籼 45 号,于 2016 年 4 月 5 日进行播种,5 月 3 日结合稻田土壤翻耕施用基肥,5 月 4 日移栽,7 月 25 日收获;晚稻供试品种为岳优 9113,6 月 28 日播种,7 月 28 日结合稻田土壤翻耕施用基肥,7 月 29 日移栽,11 月 6 日收获。早稻和晚稻均采用人工移栽,移栽行株距均为 $25.0\ cm\times 25.0\ cm$ 。各处理以等氮量为基准,不足的氮、磷、钾肥用化肥补足,保证每一年早稻和晚稻季各施肥处理 N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量均一致;早稻生育期各施肥处理总共施 N $142.5\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 54.0\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 63.0\ kg\cdot hm^{-2}$;晚稻生育期各施肥处理总共施 N $157.5\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 27.0\ kg\cdot hm^{-2}$ 、 $K_2O\ 81.0\ kg\cdot hm^{-2}$;施用有机肥的处理,早稻和晚稻的有机肥均为腐熟鸡粪,早稻季 30%有机肥和 60%有机肥处理有机肥的施用量分别为 $2\ 625.0$ 、 $5\ 250.0\ kg\cdot hm^{-2}$,晚稻季 30%有机肥和 60%有机肥处理有机肥的施用量分别为 $2\ 670.0$ 、 $5\ 340.0\ kg\cdot hm^{-2}$ (有机肥养分含量均为 N 1.77%、 $P_2O_5\ 0.80\%$ 和 $K_2O\ 1.12\%$);秸秆还田配施化肥处理,早稻季秸秆还田量为 $2\ 850\ kg\cdot hm^{-2}$,晚稻季秸秆还田量为 $3\ 000\ kg\cdot hm^{-2}$,秸秆中 N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 9.1%、1.3%和 $18.9\ g\cdot kg^{-1}$ 。早稻和晚稻季各施肥处理 N 和 K_2O 作基肥和追肥 2 次施入,基肥在耕地时施入,追肥在移栽后 7 d 施用,基追肥比例均按 7:3 施用;有机肥、秸秆和 P_2O_5 均在耕地时作基肥一次性施入。其他管理措施同常规大田生产。

1.3 样品采集和测定

2016 年 11 月,于晚稻成熟期用土钻采集各施肥处理稻田耕层土壤(0~20 cm)样品,风干后过筛,用于测定土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、

全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量，其测定方法参见文献（鲍士旦，2000）。

2016 年，在水稻齐穗期和成熟期，于每个重复中选择 5 穴水稻进行干物质测定。将植株分为茎、叶和穗 3 部分，在 105 ℃ 条件下杀青，80 ℃ 条件下烘干至恒重，测定各部位干物质重量。成熟期的植株样品烘干称重后进行粉碎，过 40 目筛，用浓硫酸消化制成待测液，N、P、K 含量分别用 Auto Analyzer3（AA3）连续流动分析仪，火焰分光光度计测定。

水稻抽穗后干物质的运转：茎叶物质转运量、抽穗后物质同化量、茎叶物质转运率、茎叶物质贡献率、抽穗后物质同化贡献率均按姜佰文等（2013）方法计算。

茎叶物质转运量（ $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ ）=抽穗期茎叶干质量-成熟期茎叶干质量；

抽穗后物质同化量（ $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ ）=成熟期干物质质量-抽穗期干物质质量；

茎叶物质转运率（%）=（抽穗期茎叶干质量-成熟期茎叶干质量）/抽穗期茎叶干质量 $\times 100\%$ ；

茎叶物质贡献率（%）=（抽穗期茎叶干质量-成熟期茎叶干质量）/成熟期稻谷质量 $\times 100\%$ ；

抽穗后物质同化贡献率（%）=（成熟期干质量-

抽穗期干质量）/成熟期稻谷质量 $\times 100\%$ ；

1.4 数据统计与分析

试验结果均以 3 次重复的平均值表示，试验数据采用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理，采用 SPSS 统计软件进行差异显著性分析。

2 分析与结果

2.1 不同施肥模式对水稻植株干物质积累与转运的影响

2.1.1 干物质积累和分配

早、晚稻成熟期，不同施肥处理水稻植株各部位干物质积累量大小顺序均表现为穗>茎秆>叶（表 1）。早稻齐穗期和成熟期，化肥（MF）、秸秆还田+化肥处理（RF）、30%有机肥+化肥处理（LOM）和 60%有机肥+化肥处理（HOM）水稻植株各部位的干物质积累量均显著高于无肥（CK）处理（ $P<0.05$ ）。早稻齐穗期和成熟期，HOM 处理植株的茎干重均显著高于 MF 和 CK 处理（ $P<0.05$ ）；RF 处理植株的叶和穗干重均显著高于 MF、LOM 和 CK 处理（ $P<0.05$ ）。

晚稻齐穗期和成熟期，MF、RF、LOM 和 HOM 处理植株的茎、叶和穗干重均显著高于 CK 处理（ $P<0.05$ ）。晚稻齐穗期和成熟期，LOM 和 HOM 处理植株的茎干重均显著高于 RF 和 CK 处理；RF 处

表1 长期不同施肥模式对水稻植株各器官干物质积累的影响

Table 1 Effects of different long-term fertilization managements on dry matter accumulation in different parts of rice plant

$\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$

Rice	Growth stages	Treatments	Part			Total dry matter accumulation of aboveground
			Stem	Leaf	Panicle	
Early rice	Full heading stage	MF	1.49±0.04 b	0.48±0.02 c	0.84±0.03 c	2.81±0.09 b
		RF	1.52±0.05 b	0.61±0.02 a	1.11±0.02 a	3.23±0.09 a
		LOM	1.58±0.04 ab	0.51±0.02 bc	1.02±0.03 b	3.11±0.08 a
		HOM	1.67±0.04 a	0.54±0.02 b	1.08±0.03 ab	3.28±0.08 a
		CK	1.02±0.03 c	0.35±0.01 d	0.57±0.02 d	1.94±0.06 c
	Mature stage	MF	0.96±0.03 b	0.37±0.01 b	2.02±0.07 c	3.35±0.12 b
		RF	1.04±0.03 ab	0.45±0.01 a	2.74±0.06 a	4.23±0.10 a
		LOM	1.10±0.03 a	0.38±0.01 b	2.48±0.07 b	3.96±0.11 a
		HOM	1.14±0.03 a	0.40±0.01 b	2.58±0.08 ab	4.11±0.12 a
		CK	0.88±0.02 c	0.30±0.01 c	0.99±0.03 d	2.17±0.06 c
Late rice	Full heading stage	MF	2.15±0.07 ab	0.71±0.02 c	1.42±0.04 b	4.28±0.14 b
		RF	2.01±0.07 b	0.88±0.02 a	1.77±0.04 a	4.65±0.13 ab
		LOM	2.29±0.05 a	0.78±0.02 b	1.48±0.04 b	4.55±0.13 ab
		HOM	2.40±0.06 a	0.84±0.03 ab	1.65±0.05 a	4.88±0.12 a
		CK	1.14±0.03 c	0.43±0.01 d	0.83±0.02 c	2.40±0.07 c
	Mature stage	MF	1.64±0.05 a	0.62±0.02 c	2.66±0.09 b	4.93±0.17 c
		RF	1.49±0.05 b	0.76±0.02 a	3.44±0.08 a	5.69±0.16 ab
		LOM	1.74±0.04 a	0.67±0.02 b	2.87±0.08 b	5.27±0.15 bc
		HOM	1.77±0.05 a	0.72±0.02 ab	3.33±0.09 a	5.82±0.14 a
		CK	0.98±0.03 c	0.39±0.01 d	1.36±0.04 c	2.72±0.08 d

MF：化肥；RF：秸秆还田+化肥；LOM：30%有机肥+70%化肥；HOM：60%有机肥+40%化肥；CK：无肥。同列内不同小写字母表示显著差异（ $P<0.05$ ）。下同。

MF: Mineral fertilizer alone; RF: Rice residues and mineral fertilizer; LOM: 30% organic matter and 70% mineral fertilizer; HOM: 60% organic matter and 40% mineral fertilizer; CK: Without fertilizer input. Values followed by different small letters within a column are significantly different at $P<0.05$. The same as below

理植株的叶和穗干重均显著高于 MF、LOM 和 CK 处理。晚稻齐穗期和成熟期,地上部分干物质积累量大小顺序表现为 HOM>RF>LOM>MF>CK,HOM 处理均显著高于 MF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。

2.1.2 干物质转运

各施肥处理早稻植株的茎、叶干物质转运量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$); 其中, HOM 和 MF 处理植株的茎干物质转运量均显著高于 RF、LOM 和 CK 处理,RF 处理植株的叶干物质转运量显著高于 MF、LOM、HOM 和 CK 处理。各施肥处理水稻植株抽穗后物质同化量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 其中以 RF 处理植株的抽穗后物质同化量为最高, 显著高于其他处理。各施肥处理水稻植株茎、叶物质转运率和茎叶物质贡献率均高于 CK 处理。各施肥处理植株的抽穗后物质同化贡献率均高于 CK 处理, 大小顺序表现为 RF>LOM>HOM>MF>CK (表 2)。

各施肥处理晚稻植株的茎、叶干物质转运量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$); 其中, HOM 处理植

株茎干物质转运量显著高于 MF、RF、LOM 和 CK 处理, RF、LOM 和 HOM 处理植株的叶干物质转运量均显著高于 MF 和 CK 处理。RF 处理植株抽穗后物质同化量为最高, 显著高于 MF、LOM、HOM 和 CK 处理。各施肥处理水稻植株茎、叶物质转运率和茎叶物质贡献率均高于 CK 处理。各施肥处理植株抽穗后物质同化贡献率均高于 CK 处理, 其大小顺序表现为 RF>HOM>LOM>MF>CK。

2.2 不同施肥模式对水稻养分吸收量的影响

2.2.1 水稻植株各器官氮素积累量

早稻成熟期, LOM 和 HOM 处理植株茎的氮素积累量均显著高于 MF、RF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。HOM 处理叶和地上部氮素积累量均显著高于 MF、RF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。RF、LOM 和 HOM 处理穗氮素积累量均显著高于 MF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。从积累比例看, 穗所占比例最大, 为 68.82%~78.16%; 茎最小, 为 12.70%~15.41%; 叶片居中, 为 9.13%~16.18% (表 3)。

晚稻成熟期, RF 和 HOM 处理植株茎氮素积累

表 2 水稻抽穗后干物质的运转
Table 2 Dry matter translocation of plant after heading stage of rice

Rice	Treatments	Amount of translocation/ (g·plant ⁻¹)		Material assimilation	Material translocation rate/ %		Material contribution rate/ %		Contribution rate of material assimilation
		Stem	Leaf	after heading stage/ (g·plant ⁻¹)	Stem	Leaf	Stem	Leaf	after heading stage/%
Early rice	MF	0.53±0.02 a	0.11±0.01 c	0.53±0.02 c	35.61	23.04	26.33	5.48	26.43
	RF	0.48±0.01 b	0.15±0.01 a	1.00±0.02 a	31.29	25.09	17.36	5.56	36.59
	LOM	0.48±0.02 b	0.13±0.01 b	0.85±0.03 b	30.23	25.31	19.26	5.22	34.24
	HOM	0.53±0.01 a	0.14±0.01 b	0.83±0.02 b	31.88	25.40	20.66	5.31	32.18
	CK	0.15±0.01 c	0.05±0.01 d	0.22±0.01 d	14.23	14.82	14.69	5.20	22.27
Late rice	MF	0.51±0.02 b	0.09±0.01 b	0.65±0.03 d	23.65	12.63	19.14	3.37	24.43
	RF	0.51±0.02 b	0.12±0.01 a	1.03±0.02 a	25.64	13.77	14.97	3.51	30.01
	LOM	0.55±0.01 b	0.11±0.01 a	0.72±0.02 c	24.02	14.68	19.17	4.00	25.20
	HOM	0.62±0.01 a	0.12±0.01 a	0.94±0.03 b	25.97	14.52	18.69	3.68	28.18
	CK	0.16±0.01 c	0.04±0.01 c	0.32±0.01 e	13.80	10.23	11.61	3.25	23.91

表3 长期不同施肥模式对水稻成熟期植株各器官氮素积累量的影响
Table 3 Effects of different long-term fertilization managements on N accumulations in different parts of rice plant at maturity stages

Rice	Treatments	Stem			Leaf			Panicle			Total N
		N content/ %	N accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	N content/ %	N accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	N content/ %	N accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	accumulation of aboveground/ (kg·hm ⁻²)
Early rice	MF	0.57±0.02 b	12.43±0.48 c	14.14	1.10±0.03 b	12.36±0.52 c	14.06	1.11±0.03 bc	63.12±2.22 b	71.80	87.91±3.22 c
	RF	0.58±0.02 b	13.75±0.47 b	13.89	1.15±0.03 b	12.87±0.42 c	13.00	1.21±0.03 ab	72.37±2.18 a	73.11	98.99±3.08 b
	LOM	0.62±0.02 b	16.45±0.39 a	15.41	1.22±0.03 a	14.75±0.37 b	13.82	1.25±0.03 a	75.53±2.08 a	70.77	106.73±2.85 ab
	HOM	0.71±0.02 a	16.77±0.35 a	15.00	1.22±0.03 a	18.09±0.35 a	16.18	1.30±0.03 a	76.95±1.82 a	68.82	111.81±2.53 a
	CK	0.38±0.01 c	5.16±0.15 d	12.70	0.72±0.02 c	3.71±0.11 d	9.13	1.01±0.03 c	31.75±0.91 c	78.16	40.62±1.17 d
Late rice	MF	0.37±0.01 c	8.57±0.34 c	10.94	1.03±0.03 a	12.46±0.38 a	15.90	1.07±0.03 b	57.32±2.03 c	73.16	78.35±2.68 b
	RF	0.48±0.01 b	11.78±0.34 a	13.11	1.07±0.03 a	13.31±0.35 a	14.81	1.10±0.03 b	64.78±2.04 b	72.08	89.87±2.63 a
	LOM	0.37±0.01 c	9.75±0.28 b	10.66	0.79±0.02 b	10.95±0.31 b	11.97	1.21±0.03 a	70.79±1.87 a	77.37	91.49±2.59 a
	HOM	0.55±0.01 a	11.91±0.24 a	12.81	0.75±0.02 b	10.47±0.30 b	11.26	1.17±0.03 ab	70.61±1.65 a	75.93	92.99±2.26 a
	CK	0.32±0.01 d	4.87±0.13 d	11.83	0.63±0.02 c	3.93±0.11 c	9.55	0.92±0.02 c	32.35±0.93 d	78.61	41.15±1.18 c

量均显著高于 MF、LOM 和 CK 处理 ($P<0.05$)。MF 和 RF 处理叶氮素积累量均显著高于 LOM、HOM 和 CK 处理 ($P<0.05$)。LOM 和 HOM 处理穗和地上部氮素积累量均显著高于 MF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。从积累比例看, 穗所占比例最大, 为 72.08%~78.61%; 茎最小, 为 10.66%~13.11%; 叶片居中, 为 9.55%~15.90% (表 3)。

2.2.2 水稻植株各器官磷素积累量

早稻成熟期, LOM 和 HOM 处理植株茎磷素积累量均显著高于 MF、RF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。HOM 处理叶磷素积累量均显著高于 MF、RF、LOM 和 CK 处理 ($P<0.05$)。LOM 和 HOM 处理穗和地上部磷素积累量均显著高于 RF、MF 和 CK 处理 ($P<0.05$), RF 和 MF 处理间无显著性差异 ($P>0.05$)。从积累比例看, 穗所占比例最大, 为 80.37%~89.06%; 叶最小, 为 3.49%~7.69%; 茎居中, 为 7.45%~11.94% (表 4)。

晚稻成熟期, HOM 处理茎、叶、穗和地上部分的磷素积累量均为最高, 均显著高于 MF、RF、

LOM 和 CK 处理 ($P<0.05$)。LOM 和 RF 处理叶磷素积累量均显著高于 MF 和 CK 处理 ($P<0.05$), 但两者间无显著性差异 ($P>0.05$)。MF、RF 和 LOM 处理穗和地上部磷素积累量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)。从积累比例看, 穗所占比例最大, 为 79.80%~89.50%; 叶最小, 为 4.02%~7.25%; 茎居中, 为 5.74%~12.95% (表 4)。

2.2.3 水稻植株各器官钾素积累量

早稻成熟期, RF、LOM 和 HOM 处理植株茎钾素积累量均显著高于 MF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。HOM 处理叶、穗和地上部分的钾素积累量均显著高于 MF、RF 和 CK 处理 ($P<0.05$)。MF 和 RF 处理水稻植株穗和地上部分的钾素积累量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 但两者间均无显著性差异 ($P>0.05$)。从积累比例看, 茎所占比例最大, 为 63.79%~74.84%; 叶片最小, 为 7.61%~12.18%; 穗居中, 为 17.16%~26.43% (表 5)。

晚稻成熟期, HOM 处理植株茎、叶、穗和地上部分的钾素积累量均显著高于 MF、RF、LOM 和

表4 长期不同施肥模式对水稻成熟期植株各器官磷素积累量的影响

Table 4 Effects of different long-term fertilization managements on P accumulations in different parts of rice plant at maturity stages

Rice	Treatments	Stem			Leaf			Panicle			Total P accumulation of aboveground/ (kg·hm ⁻²)
		P content/ %	P accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	P content/ %	P accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	P content/ %	P accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	
Early rice	MF	0.06±0.00 b	1.45±0.08 c	8.17	0.08±0.00 b	0.98±0.05 d	5.52	0.24±0.04 c	15.32±0.56 b	86.31	17.75±0.69 b
	RF	0.06±0.00 b	1.72±0.08 b	8.99	0.09±0.00 b	1.13±0.04 c	5.91	0.29±0.05 b	16.28±0.56 b	85.10	19.13±0.68 b
	LOM	0.12±0.00 a	2.85±0.04 a	11.93	0.15±0.00 a	1.62±0.03 b	6.78	0.32±0.01 a	19.41±0.46 a	81.28	23.88±0.55 a
	HOM	0.12±0.00 a	2.89±0.04 a	11.94	0.16±0.00 a	1.86±0.02 a	7.69	0.34±0.01 a	19.45±0.44 a	80.37	24.20±0.51 a
	CK	0.03±0.00 c	0.47±0.01 d	7.45	0.03±0.00 c	0.22±0.01 e	3.49	0.17±0.01 d	5.62±0.16 c	89.06	6.31±0.18 c
Late rice	MF	0.04±0.00 b	1.09±0.09 c	6.67	0.05±0.00 c	0.78±0.05 c	4.77	0.26±0.01 b	14.47±0.57 d	88.56	16.34±0.72 d
	RF	0.04±0.00 b	1.25±0.03 b	6.82	0.07±0.00 b	0.95±0.02 b	5.19	0.30±0.01 a	16.12±0.52 c	87.99	18.32±0.58 c
	LOM	0.04±0.00 b	1.17±0.03 bc	5.74	0.07±0.00 b	0.97±0.02 b	4.76	0.30±0.01 a	18.24±0.46 b	89.50	20.38±0.53 b
	HOM	0.15±0.00 a	3.23±0.03 a	12.95	0.13±0.00 a	1.81±0.02 a	7.25	0.31±0.01 a	19.91±0.41 a	79.80	24.95±0.47 a
	CK	0.04±0.00 b	0.68±0.02 d	6.51	0.05±0.00 c	0.42±0.01 d	4.02	0.25±0.01 b	9.35±0.27 e	89.47	10.45±0.31 e

表5 长期不同施肥模式对水稻成熟期植株各器官钾素积累量的影响

Table 5 Effects of different long-term fertilization managements on K accumulations in different parts of rice plant at maturity stages

Rice	Treatments	Stem			Leaf			Panicle			Total K accumulation of aboveground/ (kg·hm ⁻²)
		K content/ %	K accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	K content/ %	K accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	K content/ %	K accumulation/ (kg·hm ⁻²)	Ratio to total/ %	
Early rice	MF	3.02±0.10 c	49.91±2.28 b	63.79	0.92±0.03 b	7.65±0.41 c	9.78	0.37±0.01 bc	20.68±0.72 c	26.43	78.24±3.42 c
	RF	3.31±0.09 b	76.14±2.27 a	70.85	1.03±0.03 c	8.18±0.35 c	7.61	0.37±0.01 bc	23.14±0.68 b	21.53	107.46±3.31 b
	LOM	3.50±0.07 b	78.75±2.19 a	68.67	1.18±0.04 a	12.26±0.23 b	10.69	0.38±0.01 b	23.67±0.66 ab	20.64	114.68±3.10 ab
	HOM	3.63±0.08 a	79.12±1.44 a	66.63	1.26±0.04 a	14.46±0.22 a	12.18	0.44±0.01 a	25.16±0.59 a	21.19	118.74±2.25 a
	CK	2.43±0.10 d	43.78±1.26 c	74.84	0.75±0.03 b	4.68±0.13 d	8.00	0.34±0.01 c	10.04±0.28 d	17.16	58.5±1.68 d
Late rice	MF	2.13±0.06 c	43.80±2.44 c	72.42	0.70±0.02 b	5.07±0.35 d	8.38	0.21±0.01 b	11.61±0.43 c	19.20	60.48±3.23 d
	RF	2.80±0.10 b	47.50±1.74 c	69.89	0.83±0.03 a	7.97±0.32 c	11.73	0.23±0.01 ab	12.49±0.40 c	18.38	67.96±2.47 c
	LOM	2.86±0.08 b	60.49±1.36 b	70.67	0.86±0.03 a	11.16±0.23 b	13.04	0.24±0.01 a	13.94±0.35 b	16.29	85.59±1.96 b
	HOM	3.32±0.06 a	84.70±1.26 a	75.56	0.86±0.03 a	12.18±0.14 a	10.87	0.24±0.01 a	15.21±0.33 a	13.57	112.09±1.74 a
	CK	1.78±0.05 d	40.86±1.17 d	76.91	0.40±0.02 c	4.83±0.13 d	9.09	0.21±0.01 b	7.44±0.21 d	14.00	53.13±1.53 e

CK 处理 ($P<0.05$)。MF 和 RF 处理水稻植株茎、穗的钾素积累量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$), 但两者间均无显著性差异 ($P>0.05$)。MF、RF 和 LOM 处理植株叶和地上部分的钾素积累量均显著高于 CK 处理 ($P<0.05$)。从积累比例看, 茎所占比例最大, 为 69.89%~76.91%; 叶片最小, 为 8.38%~13.04%; 穗居中, 为 13.57%~19.20% (表 5)。

2.3 不同施肥模式对稻田土壤养分的影响

如表 6 所示, 经过 31 年连续长期定位试验后, 各施肥处理间稻田耕层 (0~20 cm) 土壤养分含量存在较大差异。不同施肥处理间土壤全氮、全磷含量均以 HOM 处理为最高, 分别为 3.41 、 $2.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均显著高于其他处理; 其次是 LOM 处理, 分别为 2.77 、 $1.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均显著高于 MF 和 CK 处理。各处理间土壤全钾含量和 pH 值均无显著性差异。HOM 和 LOM 处理土壤碱解氮和有效磷含量均为最高, 分别为 250.4 、 $212.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 167.5 、 $91.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均显著高于其他处理。HOM 处理土壤速效钾含量为最高, 达 $49.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于其他处理; 其次是 LOM 和 RF 处理, 均显著高于 MF 和 CK 处理。

3 讨论

3.1 不同施肥模式与水稻植株干物质积累与转运

水稻植株各部位的干物质积累量与其生长发育动态密切相关, 干物质积累是水稻产量的物质基础 (陈丽楠等, 2010)。同时, 水稻产量的高低与植株生产能力和同化物向生殖器官运转能力关系密切, 植株干物质转运贡献率受较多因素的影响, 如作物类型和品种、种植制度、土壤耕作、施肥、水分灌溉等栽培措施等方面 (Virmani, 1996; Peng et al., 1999; Kobata et al., 2000)。本研究结果表明, 各施肥处理均增加了水稻植株各部分的干物质积累量和转运量。其原因可能是一方面长期施肥后各施肥措施增加了稻田土壤养分含量 (表 6), 培肥土壤, 为植株对营养元素的吸收提供了物质来源, 从而增加了植株各部位的干物质累积 (唐海明等, 2015; 徐一兰等, 2015); 另一方面, 长期不同的施肥措施可改善稻田土壤理化性状、增加土壤养分含量 (表 6), 协调土壤供肥特性与植株需肥规律之间的关系, 改善植株生育后期的理化特性, 有效

防止水稻早衰 (唐海明等, 2015; 徐一兰等, 2015), 为植株各部位干物质积累奠定物质基础, 并促进了茎、叶干物质向穗部转移, 增加水稻抽穗后物质同化贡献率。

不同施肥处理间水稻植株干物质生产积累和转运存在明显差别, 秸秆还田处理增加了早稻成熟期植株的抽穗后物质同化量和抽穗后物质同化贡献率。其原因可能是在秸秆还田条件下, 配施化肥使秸秆在早稻生育期分解速率加快, 增加了稻田土壤营养物质、为早稻生长发育提供了良好的营养条件 (徐一兰等, 2016), 提高了植株各部位干物质积累量及干物质在各个器官分配量, 促进了植株茎、叶物质向穗部的转运。30%有机肥处理增加了晚稻成熟期植株茎、叶物质贡献率, 这是因为在 30%有机肥配施化肥措施下, 长期合理施用有机肥处理在晚稻生育期有部分有机肥仍然分解、释放营养物质, 为晚稻生长发育提供充足的营养物质 (徐一兰等, 2016), 增加了植株各个器官干物质的积累与分配, 促进了晚稻植株茎、叶中干物质向穗部的转运, 提高了茎叶物质转运量、茎叶物质贡献率和抽穗后物质同化量。而秸秆还田处理增加了晚稻植株抽穗后物质同化量和物质同化贡献率, 这是因为在秸秆还田措施条件下秸秆配施化肥有利于改善土壤结构、提高土壤酶活性、增加养分的有效性, 为晚稻生长发育提供充足的营养物质 (徐一兰等, 2016), 增加了生育前期植株各器官干物质积累, 扩大了库容、促进了生育后期植株茎叶物质向穗部的转运, 提高了植株抽穗后物质同化贡献率, 为水稻高产提供了物质来源, 从而为水稻获得高产提供物质基础, 这与唐海明等 (2015) 和易镇邪等 (2013) 的研究结果相似。在本研究中, 秸秆还田和 30%有机肥处理植株的茎秆物质转运量和物质转运率均低于其他施肥处理, 这是因为茎的物质转运率增加, 会导致过多的茎秆物质输出, 易造成倒伏, 适当的茎秆物质输出是水稻稳产的前提条件, 这与罗盛国等 (2015) 的研究结果相似。

3.2 不同施肥模式与水稻植株养分积累

施肥是提高水稻产量的关键措施, 不同施肥措施影响植株各个器官的养分含量。施用有机肥有利于改善土壤结构, 增加土壤有机质含量等, 培肥土

表6 长期施肥模式对稻田土壤养分的影响

Table 6 Effects of different long-term fertilization managements on soil nutrients content (0~20 cm)

Treatments	Total N/(g·kg ⁻¹)	Total P/(g·kg ⁻¹)	Total K/(g·kg ⁻¹)	Available N/(g·kg ⁻¹)	Available P/(g·kg ⁻¹)	Available K/(g·kg ⁻¹)	pH
MF	2.01±0.10 c	0.67±0.07 c	19.0±0.54 a	149.5±7.23 d	6.83±0.20 c	31.3±1.44 c	6.58±0.19 a
RF	2.28±0.09 b	0.65±0.05 c	19.3±0.56 a	185.1±6.13 c	5.48±0.16 c	35.8±1.03 b	6.17±0.18 a
LOM	2.77±0.07 b	1.76±0.02 b	18.6±0.57 a	212.5±5.34 b	91.6±2.64 b	34.5±1.02 b	6.09±0.17 a
HOM	3.41±0.06 a	2.55±0.02 a	19.7±0.55 a	250.4±4.32 a	167.5±4.84 a	49.8±0.90 a	6.32±0.18 a
CK	1.87±0.05 d	0.49±0.01 d	18.5±0.53 a	125.2±3.61 e	3.68±0.11 c	28.2±0.81 d	6.48±0.19 a

壤; 秸秆还田是当前农业生产中所普遍采用的一种施肥措施, 这是由于秸秆中含有丰富的碳、氮、磷、钾以及中微量元素, 秸秆还田后腐解释放养分, 对减少化肥用量和培肥土壤等方面均具有重要的意义。前人研究结果表明, 水稻生育后期籽粒的营养元素主要依靠营养器官进行物质转运 (Mae, 1997)。张磊等 (2017) 研究表明, 秸秆翻压还田有利于增加水稻植株的氮、磷养分积累量。Toriyama (2002) 研究认为, 氮转运率变化范围 44.7%~66.7%, 氮转运贡献率变化范围 29.6%~59.7%; Norman et al. (1992) 发现, 水稻植株的转运氮贡献率可达 80%。本研究结果显示, 各施肥处理条件下水稻植株群体干物质积累量和氮、磷、钾素积累量均显著高于无肥对照, 其原因可能是长期施肥增加了稻田土壤养分含量 (表 6), 为水稻植株群体干物质积累提供了养分供应, 增加其营养元素含量和干物质积累量, 从而增加了各施肥处理植株各部位养分积累量。

各个长期不同施肥处理间植株的氮、磷、钾素积累量存在明显的差异。其中, 以 60% 有机肥处理早稻植株茎、叶、穗的氮素积累量为最高, 30% 有机肥处理穗部氮素积累量较高、叶片氮素积累量较低, 其原因可能是长期 60% 有机肥处理, 明显增加了稻田土壤中的养分含量 (表 6), 在早稻生育期外界温度较低条件下, 较好的营养条件为早稻生长提供了物质基础, 增强了植株的部分生理特性 (Ko et al., 2017), 有利于提高各部位干物质积累量和养分含量, 从而增加植株茎、叶、穗的氮素积累量; 而长期 30% 有机肥处理也有利于培肥土壤, 为植株的干物质积累奠定基础, 但该施肥处理促进了叶片中氮素向营养器官的转运, 降低了叶片中氮素积累量、增加了穗部氮素积累量。秸秆还田处理晚稻植株茎、叶氮素积累量为最高, 有机-无机肥配施处理 (LOM 和 HOM) 穗部氮素积累量最高、茎和叶氮素积累量较低, 其原因可能是晚稻生育期外界气温较高, 有利于秸秆和有机肥的分解, 提高了土壤中养分有效性, 为植株养分积累提供了物质来源, 其中秸秆还田处理提高了茎、叶中氮的含量, 但植株茎、叶中物质向营养器官的转运率和贡献率较低, 从而增加了茎和叶中氮素积累量、降低了穗部氮素积累量 (表 3)。长期有机-无机肥配施处理有利于改善植株各部位物质的分配与转运, 增加茎叶物质转运量、转运率和物质贡献率 (表 2), 从而提高穗部氮素积累量、降低茎和叶氮素积累量。早稻和晚稻成熟期, 有机-无机肥配施处理 (LOM 和 HOM) 植株茎、叶、穗的磷和钾素积累量均为最高, 均明显高于其他施肥处理, 这可能是由于长期有机-无机

肥配施有利于改善土壤理化特性、培肥土壤 (表 6), 为水稻生长发育提供了营养来源, 一方面增加了植株各部位氮、磷、钾素的含量, 另一方面有利于增加植株各部位的干物质积累, 且茎叶物质转运率和茎叶物质贡献率适中, 干物质在植株各部位分配合理, 从而增加了植株茎、叶、穗的磷和钾素积累量。在本研究中, 水稻成熟期各施肥处理植株不同部位氮、磷、钾素的积累量大小受植株不同部位干物质积累量和养分含量的影响, 植株不同部位氮、磷的养分积累量大小顺序均表现为穗>茎秆>叶, 植株氮、磷的积累量受各部位干物质积累量的影响较大; 而钾素的积累量大小顺序则表现为茎秆>穗>叶, 其积累量的高低与各部位钾素含量及干物质积累量大小密切相关 (表 1 和表 5)。

本研究结果表明, 各施肥模式间水稻植株养分积累和分配比例均存在一定的差异。早稻生育期, 有机-无机肥配施处理 (LOM 和 HOM) 增加了植株茎、叶氮、磷和钾素积累量占地上部总积累量的百分数, 降低了穗部氮、磷和钾素积累量占地上部总积累量的百分数, 这是因为有机-无机肥配施处理植株茎和叶氮、磷和钾含量均明显高于其他处理, 且茎和叶干物质积累量均明显高于其他处理, 而穗干物质积累量低于秸秆还田处理 (表 1); 秸秆还田处理降低了茎、叶氮素积累量占地上部总积累量的百分数, 增加了穗部的百分数, 其原因因为秸秆还田处理降低了植株茎和叶干物质积累量、增加了穗干物质积累量。晚稻生育期, 60% 有机肥处理增加了植株茎、叶的磷和钾素积累量占地上部总积累量的百分数, 降低了穗部的磷和钾素积累量占地上部总积累量的百分数, 这可能是因为该施肥处理增加了植株的茎、叶干物质积累及相应的养分积累量, 且穗部干物质积累和磷、钾含量与其他处理均无明显差异, 因此增加了植株茎和叶、降低了穗部的磷和钾素积累量占地上部总积累量的百分数; 而秸秆还田处理增加了茎、叶的氮素积累量占地上部总积累量的百分数、降低了穗部的百分数, 这是因为秸秆还田条件下各部位干物质积累量与其他处理无明显差异, 但增加了植株茎叶氮含量、降低了穗部氮含量 (表 3)。早稻成熟期, 穗部的氮、磷和钾素积累量分别占地上部总积累量的 68.82%~73.11%、80.37%~86.31% 和 20.64%~26.43%; 晚稻成熟期, 穗部积累的氮、磷和钾素积累量分别占地上部总积累量的 72.08%~77.37%、79.80%~89.50% 和 13.57%~19.20%; 各处理间植株养分积累和分配比例出现差异的原因可能与所施用的肥料类型和施用量不同有关 (石祖梁等, 2016)。各处理水稻植株叶片和茎秆的花前干物质贮藏量和转运量均表

现为茎秆高于叶片,其原因可能是长期施肥改善了稻田土壤养分,有利于增加花前水稻植株干物质积累量,改善植株各部位养分转运,促进了后期茎秆中养分向穗部的转运,为水稻高产奠定了物质基础,这与姜佰文等(2013)研究结果一致。

本研究仅进行了不同施肥模式对水稻植株各部位干物质积累和养分转运特征的初步研究,有关植株的生理特性及与营养特性之间的相关性还有待进一步研究。

4 结论

在水稻植株干物质积累与转运方面:长期施肥处理有利于增加早稻和晚稻成熟期植株各部位的干物质积累量。早稻和晚稻成熟期,长期施用秸秆还田、有机肥配施化肥处理均有利于增加植株的叶、穗和地上部分群体干物质积累量。长期施用60%有机肥处理水稻植株的茎物质贡献率为最高,均明显高于其他处理,促进了茎部干物质向穗部位转运;长期施用秸秆还田处理水稻植株的叶物质贡献率、抽穗后物质同化量和抽穗后物质同化贡献率均为最高,高于其他处理,促进了叶干物质向穗部位转运。

在水稻植株养分积累方面:长期施用60%有机肥处理有利于增加早稻成熟期植株茎、叶、穗和地上部的氮、磷和钾素积累量;长期秸秆还田处理增加了晚稻成熟期植株茎、叶氮素积累量,60%有机肥处理增加了植株茎、叶、穗和地上部分的磷和钾素积累量。长期秸秆还田、有机肥配施化肥处理均有利于提高稻田耕层(0~20 cm)土壤养分含量,培肥土壤。

参考文献:

- GAO X J, HU X F, WANG S P, et al. 2002. Nitrogen losses from flooded rice field [J]. *Pedosphere*, 12(2): 151-157.
- KO K M M, HIRAI Y, ZAMORA O B, et al. 2017. Agronomic and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) under different water management systems, fertilizer types and seedling age [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 8(13): 3338-3349.
- KOBATA T, SUGAWARA M, TAKATU S. 2000. Shading during the early grain filling period does not affect potential grain dry matter increase in rice [J]. *Agronomy Journal*, 92(3): 411-417.
- MAE T. 1997. Physiological nitrogen efficiency in rice: nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential [J]. *Plant and Soil*, 196(2): 201-210.
- NORMAN R J, GUINDO O, WELLS B R, et al. 1992. Seasonal accumulation and partitioning of nitrogen-15 in rice [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 56(5): 1521-1527.
- PENG S, CASSMAN K G, VIRMANI S S, et al. 1999. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential [J]. *Crop Science*, 39(6): 1552-1559.
- ROELCK M, HAN Y, SCHLEEF K H, et al. 2004. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China [J]. *Pedosphere*, 14(4): 449-460.
- TANG H M, XIAO X P, WANG K, et al. 2016. Methane and nitrous oxide emissions as affected by long-term fertilizer management from double-cropping paddy fields in Southern China [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 154(8): 1378-1391.
- TORIYAMA K. 2002. Estimation of fertilizer nitrogen requirement for average rice yield in Japanese paddy fields [J]. *Soil Science Plant Nutrition*, 48(3): 293-300.
- VIRMANI S S. 1996. Hybrid rice [J]. *Advances in Agronomy*, 57(8): 377-462.
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社: 25-108.
- 陈丽楠, 彭显龙, 刘元英, 等. 2010. 养分管理对寒地水稻干物质积累及运转的影响[J]. *东北农业大学学报*, 41(5): 52-55.
- 陈敏, 马婷婷, 丁艳萍, 等. 2014. 配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 20(1): 237-246.
- 郝晓晖, 胡荣桂, 吴金水, 等. 2010. 长期施肥对稻田土壤有机氮、微生物生物量及功能多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 21(6): 1477-1484.
- 姜佰文, 李贺, 王春宏, 等. 2013. 有机无机肥料配合施用对水稻干物质积累及运转的影响[J]. *东北农业大学学报*, 44(5): 10-13.
- 李娟, 黄平娜, 刘淑军, 等. 2011. 不同施肥模式对水稻生理特性、产量及其N肥农学利用率的影响[J]. *核农学报*, 25(1): 169-173.
- 李凯, 窦森, 韩晓增, 等. 2010. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响[J]. *土壤学报*, 47(3): 579-583.
- 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 2015. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. *中国农业科学*, 48(3): 488-500.
- 罗盛国, 尹宇龙, 刘元英, 等. 2015. 养分管理对寒地直播稻干物质积累、转运及产量影响[J]. *东北农业大学学报*, 46(12): 16-23, 32.
- 彭耀林, 朱俊英, 唐建军, 等. 2004. 有机无机肥长期配施对水稻产量及干物质生产特性的影响[J]. *江西农业大学学报*, 26(4): 485-490.
- 邵兴华, 张建忠, 夏雪琴, 等. 2012. 长期施肥对水稻土壤酶活性及理化特性的影响[J]. *生态环境学报*, 21(1): 74-77.
- 石祖梁, 顾东祥, 张传辉, 等. 2014. 施氮量对稻茬小麦秸秆干物质和养分垂直分布的影响[J]. *麦类作物学报*, 34(1): 114-119.
- 谭周进, 冯跃华, 刘芳, 等. 2004. 稻作制与有机肥对红壤水稻土微生物及酶活性的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 12(2): 121-123.
- 唐海明, 程爱武, 徐一兰, 等. 2015. 长期有机无机肥配施对双季稻区水稻干物质积累及产量的影响[J]. *农业现代化研究*, 36(6): 1091-1098.
- 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 2006. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 12(4): 459-465.
- 徐一兰, 唐海明, 程爱武, 等. 2015. 双季稻区长期不同施肥模式对水稻干物质积累及产量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 42(5): 674-680.
- 徐一兰, 唐海明, 肖小平, 等. 2016. 长期施肥对双季稻田土壤微生物学特性的影响[J]. *生态学报*, 36(18): 5847-5855.
- 易镇邪, 刘书波, 陈冬林, 等. 2013. 不同复种制下秸秆还田对水稻生产能力的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 39(6): 565-569.
- 张娟琴, 郑宪清, 李双喜, 等. 2017. 不同施肥处理对花菜-毛豆轮作系统碳收支的影响[J]. *生态环境学报*, 26(7): 1131-1136.
- 张磊, 戴志刚, 鲁明星, 等. 2017. 秸秆还田方式对水稻产量及养分吸收的影响[J]. *湖北农业科学*, 56(1): 51-55.
- 张奇春, 王光火, 方斌. 2005. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. *土壤学报*, 42(1): 116-121.
- 张文锋, 袁颖红, 周际海, 等. 2016. 长期施肥对红壤性水稻土碳库管理指数和双季水稻产量的影响[J]. *生态环境学报*, 25(4): 569-575.

张小莉, 孟琳, 王秋君, 等. 2009. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 20(3): 624-630.

郑盛华, 陈红琳, 陈雨芝, 等. 2017. 川西平原不同基础地力和施肥对水稻生长及产量的影响[J]. 中国农学通报, 33(23): 63-67.

Effects of Different Long-term Fertilization Managements on Nutrition Accumulation and Translocation of Rice Plant in Double Cropping Paddy Field

TANG Haiming, XIAO Xiaoping, LI Chao, CHENG Kaikai, WANG Ke, SUN Gen, ZHANG Fan, PAN Xiaochen
Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China

Abstract: Long-term fertilization is an important agronomic management that affects the physical and chemical properties of paddy soil, and results in affecting the growth and development of rice (*Oryza sativa* L.). Therefore, the effects of different fertilizer regimes on dry matter accumulation and translocation of nutrient of rice plant, which the results has important practical significance for selecting better fertilizer regimes with higher nutrient efficient utilization. In China, few studies have investigated the influence of long-term chemical fertilizer, combined application of organic matter with chemical fertilizer on dry matter accumulation and translocation of nutrient of rice plant. Our objective was to explore the characteristics of dry matter accumulation and translocation of nitrogen (N), phosphorous (P) and potassium (K) of early and late rice plant under different long-term fertilizer regimes in a double-cropping rice system. A long-term experiment was established in 1986 in Ningxiang county of Hunan Province, China, and five different fertilization treatments were applied: (1) Without fertilizer input (CK); (2) Mineral fertilizer alone (MF); (3) Rice straw residue and mineral fertilizer (RF); (4) 30% organic matter and 70% mineral fertilizer (LOM); And (5) 60% organic matter and 40% mineral fertilizer (HOM). We analyzed the dry matter accumulation and translocation of nutrient of rice plant with the above five fertilization treatments by using conventional experimental analysis methods. The results showed that dry matter accumulation in different parts of rice plant, material translocation rate and material contribution rate of stem and leaves with MF, RF, LOM, HOM treatments were higher than that of the CK treatment at mature stages of early and late rice. Meanwhile, the contribution rate of material assimilation after heading stage with MF, RF, LOM, HOM treatments were higher than that of the CK treatment, and the contribution rate of material assimilation after heading stage with different fertilization treatments was RF>HOM>LOM>MF>CK at early and late rice mature stages, respectively. The N, P and K accumulation amount in stem, leaves, panicle and aboveground of rice plant with HOM treatment were higher than that of the MF and CK treatments at mature stage of early rice ($P<0.05$). Compared with the CK treatment, the N, P and K accumulation amount in stem, leaves, panicle and aboveground of rice plant with HOM treatment increased 11.61, 14.38, 45.20, 71.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 2.42, 1.64, 13.83, 17.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and 35.34, 9.78, 15.12, 60.24 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, at mature stage of early rice. Meanwhile, the N accumulation amount in stem and leaves of rice plant with RF treatment were higher than that of the LOM and CK treatments at mature stage of late rice ($P<0.05$). Compared with the CK treatment, the N accumulation amount in stem and leaves of rice plant with RF treatment increased 6.91 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 9.38 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, at mature stage of late rice. Meanwhile, the P and K accumulation amount in stem, leaves, panicle and aboveground of rice plant with HOM treatment were higher than that of the MF, RF, LOM and CK treatments at mature stage of late rice ($P<0.05$). Compared with the CK treatment, the P and K accumulation amount in stem, leaves, panicle and aboveground of rice plant with HOM treatment increased 2.55, 1.39, 10.56, 14.50 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and 43.84, 7.35, 7.77, 58.96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, at mature stage of late rice. Compared with the CK treatment, the amount of accumulation and translocation of dry matter in different parts of early and late rice plants were increased under long-term application of fertilization treatments. As a result, it is benefit to increase the dry matter accumulation, nutrients accumulation and translocation of rice plants with RF, LOM and HOM treatments.

Key words: rice; fertilizer management; dry matter; accumulation; translation