

有机无机复混肥料对水稻产量及养分吸收利用的影响

戴黎¹, 胡诚^{2*}, 万建华¹, 徐化林¹, 刘茂军¹, 郭卫红¹, 乔月¹

(1. 华强化工集团股份有限公司, 湖北 宜昌 444100;

2. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064)

摘要: 为了提高水稻肥料利用率, 减少化肥施用量, 研究有机无机复混肥的施用效果, 设置不施肥 (CK)、常规施肥 (普通复合肥, 氮肥分次施用) (FFP)、等养分有机无机复混肥 (一次性施肥) (T1)、等养分有机无机复混肥 (氮肥分次施用) (T2)、90% 养分有机无机复混肥 (氮肥分次施用) (T3)、80% 养分有机无机复混肥 (氮肥分次施用) (T4) 共 6 个处理, 研究有机、无机肥配施对水稻产量及氮磷吸收利用的影响。各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率 (62.7% ~ 68.5%) 均高于干物质转运量对籽粒贡献率 (31.5% ~ 37.3%); 各处理的实际产量表现为 T2>T1>FFP>T3>T4>CK, 与 FFP 处理相比, T2 和 T1 处理增产 6.6% 和 2.2%, T3 和 FFP 处理产量无显著差异; 成熟期各处理水稻植株地上部氮素和磷素吸收积累量在籽粒部分占比达到 65% 和 70% 以上, 与 FFP 处理相比, T1 处理氮磷肥吸收利用率、氮磷肥农学利用率和氮磷肥偏生产力分别增加了 8.9% 和 12.9%、0.9% 和 3.2%、0.9 和 3.2 kg·kg⁻¹, T2 处理氮磷肥吸收利用率、氮磷肥农学利用率和氮磷肥偏生产力分别增加了 1.6% 和 1.6%、2.6% 和 9.6%、2.6 和 9.6 kg·kg⁻¹, T3 和 T4 处理与 FFP 处理差异不显著。有机、无机肥配施能提高氮磷养分吸收利用率, 在氮磷钾总养分相同的情况下, 一次性施用有机无机复混肥更有利于提高水稻氮磷吸收, 在氮肥分次施用情况下, 有机无机复混肥增产效果更明显, 适当减肥不会降低水稻产量, 还可以减少稻田养分残留。

关键词: 有机无机复混肥; 产量; 肥料利用率; 养分吸收; 干物质积累

水稻养分管理是获得高产和良好经济效益的关键因素, 特别是化肥, 在农业增产中更是起着举足轻重的作用。近年来由于化学肥料的不合理施用, 存在过量施肥、氮磷钾肥比例不平衡、盲目施肥等问题, 使得土壤容重增加、孔隙度减小、氮磷大量流失、营养元素利用率低, 严重影响作物产量和品质, 影响了农民的经济效益, 同时带来了一系列生态环境问题^[1-3]。与化学肥料相比, 有机肥料能够改良土壤, 增加养分利用率, 延长肥效, 为作物提供较为全面的营养, 对作物生长和高产稳产有着积极作用^[4-5], 但是养分含量较低, 且释放缓慢。有机、无机肥配合施用更加合理, 有机无机复混肥是一种既含有机质又含适量无机养分的复混肥料, 同时含有的大量有益菌能起到增加肥料利用率的作用, 使养分速效加缓效, 从而能促

进水稻对养分的吸收, 增加肥料利用率, 减少化肥投入量, 使水稻种植绿色环保^[6]。目前, 针对有机无机复混肥对作物生长、产量、土壤肥力及生态环境的影响研究较多^[7-9], 但是受地区差异、种植制度、管理措施不同等影响, 前人研究结果不尽相同。另外, 随着原料价格的日益上涨, 化学肥料的生产成本随之增加, 因此, 如何通过科学调整肥料种类, 以及水稻的肥料减施方案及其机理, 达到水稻生产中的减肥增效目的, 同时不影响水稻产量, 成为现今研究水稻养分管理的重点问题, 本文在水稻种植中开展有机无机复混肥减量施用试验, 为科学、系统地指导水稻施肥提供参考, 有助于提高水稻养分利用效率并降低环境风险。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2022 年在湖北省当阳市河溶镇前合村水稻试验基地 (东经 111° 56', 北纬 30° 36') 进行, 该基地地处中亚热带与北亚热带交汇区, 为

收稿日期: 2023-02-02; 录用日期: 2023-03-31

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1901204)。

作者简介: 戴黎 (1995-), 硕士研究生, 从事农业水土资源与环境研究。E-mail: qingniandaili@sina.com。

通讯作者: 胡诚, E-mail: huchenghxx@163.com。

大陆性季风气候，四季分明，光热充足，春秋两季较短，无霜期长，属典型的亚热带季风气候，太阳年辐射总量为 $356 \sim 477 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，历年平均降水量 996.8 mm ，年平均相对湿度 76% ，年平均无霜期 270 d ，每年5—10月为雨季。试验地常年进行水稻—油菜轮作，土壤质地为粘壤土， $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕层土壤pH值为6.85，有机质含量 $24.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，碱解氮含量 $117.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷含量 $7.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量 $109.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计，依据当地农民常

规施肥量设置6个施肥处理：（1）不施肥（CK）；（2）常规施肥（FFP）；（3）有机无机复混肥料（与当地推荐施肥等养分），一次性施肥（T1）；（4）有机无机复混肥料（与当地推荐施肥等养分），氮肥分次施用（T2）；（5）有机无机复混肥料（总养分是当地推荐施肥的90%），氮肥分次施用（T3）；（6）有机无机复混肥料（总养分是当地推荐施肥的80%），氮肥分次施用（T4）；其中试验处理T2～T4均与常规施肥的施肥习惯保持一致。常规施肥基肥施用普通复合肥（养分含量为51%， $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=25\text{-}10\text{-}16$ ） $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，分蘖期追施 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的尿素。

表1 试验施肥方案 (kg·hm⁻²)

处理	施肥量			基肥				分蘖肥
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	普通复合肥	有机无机复混肥	尿素	氯化钾	尿素
CK	0	0	0		—	—	—	—
FFP	219	60	96	600	—	—	—	150
T1	219	60	96	—	750	182.6	47.5	—
T2	219	60	96	—	750	32.6	47.5	150
T3	197.1	54	86.4	—	675	29.4	42.8	135
T4	175.2	48	76.8	—	600	26.1	38	120

施肥处理中氮肥和钾肥不足部分用尿素（N 46%）和氯化钾（K₂O 60%）补充。磷、钾肥全部基施。普通复合肥由华强化工集团有限公司生产；有机无机复混肥养分含量为35%（ $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=18\text{-}8\text{-}9$ ），由华强生物科技有限公司生产。

试验采用随机区组设计，小区面积 20 m^2 （ $4.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$ ），小区间筑埂，上覆塑料薄膜防止串水串肥。区组间留 0.5 m 宽的沟，各小区设有单独的灌排水管，单灌单排，其他田间管理与大田一致。水稻供试品种为荃优丝苗，工厂育苗、人工移栽。2022年5月19日施基肥耙田后移栽，每穴2株，种植规格为 $20 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 。5月26日施分蘖肥，9月4日收获。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 分蘖数

避开小区边缘，每个小区随机固定标记10株水稻，从分蘖初期开始5～7d观测1次分蘖数，直到分蘖结束，成熟期再统计1次有效穗数。

1.3.2 干物质积累量与养分含量测定

分别于花期和成熟期每小区随机选取5株具有代表性的水稻植株，整株全部带回实验室，去除地下部后按茎、叶、穗分装，经 105°C 杀青、 80°C 烘

干、称重。干物质积累量为茎、叶、穗干物质之和。将茎、叶、穗样品直接粉碎，分析全氮和全磷含量。

1.3.3 考种与收获

成熟期每小区单收单打，记录实际产量。在成熟期，调查连续10蔸水稻的有效分蘖数，计算其平均有效分蘖数，然后在每小区采集与平均有效分蘖数相等的3蔸植株样，带回实验室用于考种，测定每株穗长、有效籽粒数、分蘖数、结实率和千粒质量^[10]。

1.3.4 土壤采集与指标测定

试验开始前采用“五点取样法”采集耕层（ $0 \sim 20 \text{ cm}$ ）土样样品，测定pH值和碱解氮、有机质、有效磷和速效钾含量，采用常规方法测定^[11]。

1.4 数据分析

应用DPS 15.10进行方差分析，LSD法进行处理间多重比较，利用Excel 2020作图。相关指标计算方法^[12-13]如下：

成穗率 = 成熟期的有效穗数 / 分蘖盛期茎蘖数；

花前干物质积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 花期干物质积累量；

花后干物质积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 成熟期干物

质积累量 - 花期干物质积累量;

花前干物质积累率 (%) = 花期干物质积累量 / 成熟期干物质积累量 × 100;

花后干物质积累率 (%) = 花后干物质积累量 / 成熟期干物质积累量 × 100;

茎叶干物质转运量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 花期干物质积累量 - 成熟期茎叶干物质积累量;

茎叶干物质转运率 (%) = 茎叶干物质转运量 / 花期干物质积累量 × 100;

茎叶干物质转运量对籽粒贡献率 (%) = 茎叶干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100;

花后干物质积累量对籽粒贡献率 (%) = 花后干物质积累量 / 成熟期籽粒干重 × 100;

每生产 100 kg 籽粒吸氮 (磷) 量 (kg) = 植株氮 (磷) 素积累总量 / 稻谷产量 × 100;

氮 (磷) 肥吸收利用率 (%) = [施氮区氮 (磷) 素积累量 - 不施氮区氮 (磷) 素积累量] / 施氮量 × 100

氮 (磷) 肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 施氮 (磷) 区产量 / 施氮 (磷) 量;

氮 (磷) 肥农学利用率 (%) = [施氮 (磷) 区籽粒产量 - 不施氮 (磷) 区籽粒产量] / 施氮 (磷) 量 × 100;

氮肥生理利用率 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / (施氮区氮素积累总量 - 不施氮区氮素积累量);

氮肥贡献率 (%) = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮区产量 × 100;

土壤氮 (磷) 素依存率 (%) = 不施氮区氮 (磷) 素积累总量 / 施氮区氮 (磷) 素积累总量 × 100。

2 结果与分析

2.1 有机无机复混肥施用对水稻分蘖的影响

有机无机复混肥施用水稻茎蘖数和成穗率如图 1 所示。各施肥处理分蘖盛期茎蘖数量均高于 CK 处理, 其中 FFP 处理茎蘖数最高, 为 496.6×10^4 个 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 较 CK 显著增加 69%; 而 T1、T2、T3 和 T4 处理均显著低于 FFP 处理。从成穗率来看, 各施肥处理成穗率均高于 CK 处理, 其中 T1、T2 和 T4 处理分别为 79.8%、74.0% 和 67.2%, 均显著高于 CK 和 FFP 处理; T3 处理的成穗率与 FFP 差异不显著。说明常规施处理养分释放迅速, 使水稻前期营养生长旺盛, 群体分蘖数量大, 但不利于后期有效穗的形成。

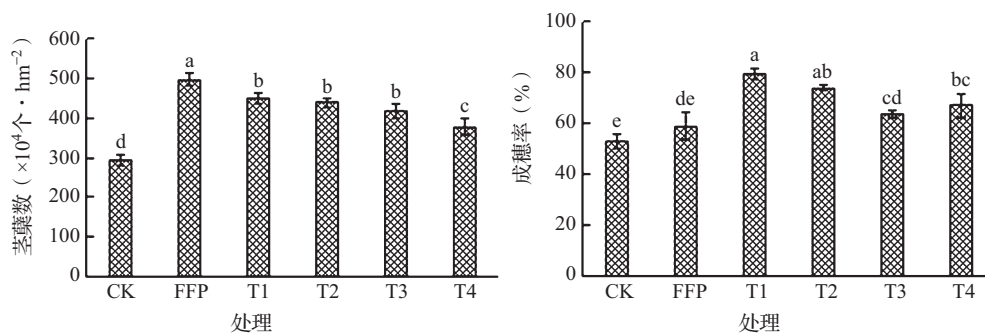


图 1 有机无机复混肥施用水稻的茎蘖数和成穗率

注: 小写字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 有机无机复混肥施用对水稻干物质积累和转运的影响

有机无机复混肥施用对水稻干物质积累和转运的影响不同 (表 2)。从干物质积累量来看, 各施肥处理的花前干物质、花后干物质和总积累量均显著高于 CK, 其中 T1 的花前干物质、花后干物质和总积累量均显著高于其他处理。从干物质积累率来看, T2 处理更有利于花前干物质的积累, 积累率达到 63.3%; T4 处理则更有利于花后干物质的积累, 积累率达到 40.4%。从茎叶干物质转运量和对籽粒的贡献率来看, T2 处理更有利于花前干物质的转

运, 干物质转运率达到 34.6%, 转运量对籽粒的贡献率高达 37.3%, T4 处理花后干物质积累量对籽粒的贡献率高达 68.5%。各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率 (62.7% ~ 68.5%) 均高于干物质转运量对籽粒贡献率 (31.5% ~ 37.3%)。

2.3 有机无机复混肥施用对水稻产量及其构成因素的影响

有机无机复混肥施用下水稻产量见表 3。施肥处理的水稻有效穗数、每穗总粒数和产量均显著高于 CK, 各处理的产量表现为 $T2 > T1 > FFP > T3 > T4 > CK$, T2 处理产量分别显著高于 CK 和 FFP 处理 44.3% 和 6.6%,

表 2 有机无机复混肥施用下水稻干物质积累、转运及对籽粒的贡献率

处理	干物质积累量 (kg · hm ⁻²)			干物质积累率 (%)		转运量 (kg · hm ⁻²)	转运率 (%)	对籽粒贡献率 (%)	
	花前	花后	总积累量	花前	花后			转运量	花后积累量
CK	5774.6d	3355.4c	9130.0e	63.2a	36.8b	1942.1c	33.5a	36.6a	63.4b
FFP	9394.2b	5987.5ab	15381.7b	61.1a	38.9ab	2896.7ab	30.8ab	32.6a	67.4ab
T1	10688.6a	6352.1a	17040.7a	62.7a	37.3ab	3132.3ab	29.3b	33.0a	67.0ab
T2	9616.3b	5587.1b	15203.3bc	63.3a	36.8b	3322.9a	34.6a	37.3a	62.7b
T3	9191.7b	5699.2b	14890.8cd	61.7a	38.3ab	3042.5ab	33.1ab	34.8a	65.2ab
T4	8700.0c	5900.0b	14600.0d	59.6a	40.4a	2712.5b	31.1ab	31.5a	68.5a

表 3 有机无机复混肥施用下水稻产量及其构成因素

处理	每苑有效穗数	穗长 (cm)	每穗总粒数	结实率 (%)	千粒质量 (g)	产量 (kg · hm ⁻²)
CK	8.0d	23.4c	163.5e	82.4a	24.9b	6406.8d
FFP	15.0bc	26.1ab	177.4c	84.7a	25.7ab	8669.6bc
T1	18.3a	26.1abc	183.2b	85.5a	25.9a	8858.1b
T2	16.7ab	27.4a	187.7a	85.7a	26.1a	9244.7a
T3	13.7c	25.1abc	175.1c	84.6a	25.5ab	8571.0bc
T4	13.0c	24.6bc	170.7d	83.9a	25.4ab	8151.6c

T2 处理水稻穗长显著长于 CK，T1 和 T2 处理千粒质量显著高于 CK，各处理间结实率无显著差异，T2 处理每穗总粒数显著高于 T1 和 FFP 处理，与产量的表现基本一致，表明每穗总粒数是影响产量构成的最主要方面。T1、T3、T4 和 FFP 处理间产量无显著差异，表明同等追施比例情况下，减肥 10% 不会导致水稻减产。

2.4 有机无机复混肥施用对水稻氮素吸收利用的影响

2.4.1 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位氮含量

有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位氮含量见图 2，各施肥处理茎、叶、籽粒的氮含量均高

于不施肥处理，说明施肥可显著提高水稻茎、叶、籽粒的氮含量。在成熟期，水稻的氮含量为籽粒 > 叶 > 茎。在各施肥处理中，水稻茎中以 T2 处理处于最高水平，但是与 T1 和 T3 处理无显著差异，且显著高于 FFP 处理；叶中含氮水平 T1 和 T2 处理最高，分别显著高出 T3 处理 6.2% 和 5.3%，高出 T4 处理 21.8% 和 20.8%，且显著高于 FFP 处理，但 T1 和 T2 处理二者间无显著性差异；籽粒中氮含量以 T1 处理处于最高水平，且显著高于其他处理，较 T2、T3 和 T4 处理分别增加 3.3%、7.1% 和 8.6%。表明有机无机复混肥可促进水稻茎、叶、籽粒氮的吸收，且减施 10% 养分不会降低茎、叶、籽粒中氮含量。

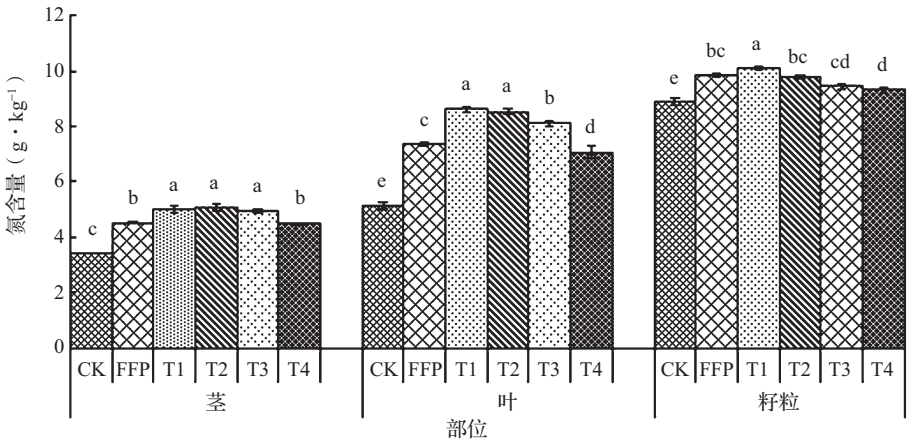


图 2 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位氮含量

2.4.2 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位氮素吸收及其分配

有机无机复混肥施用下水稻植株成熟期不同部位氮吸收积累量如图 3 所示。成熟期各处理水稻植株地上部氮素吸收积累量在籽粒部分占比达到 65% 以上, CK 处理达到 75.5%, 相较 FFP、T1、T2、T3 和 T4 处理分别高出 4.8%、8.6%、7%、6.9% 和 4.4%, 表明施肥会影响营养器官养分向籽粒转移的量。不施肥处理茎、叶、籽粒中氮素吸收积累量处于最低水平, T1 处理水稻地上部的氮素吸收积累量表现为最高, 茎中氮素吸收积累量分别较 FFP、

T2、T3、T4 增加 34.4%、25.5%、30.8%、47.6%, 且达到显著水平, 但是 T3 和 T2 处理间无显著差异; 叶中氮素吸收积累量分别较 FFP、T2、T3、T4 增加 26.2%、11.8%、19.9%、43.3%, 且各处理间差异均达到显著水平; 籽粒中氮素吸收积累量分别较 FFP、T2、T3、T4 增加 9.6%、10.0%、16.2%、19.6%, 且达到显著水平, 同时 T2、T3 和 FFP 处理无显著差异。表明有机无机复混肥可以促进水稻茎、叶、籽粒氮素吸收, 且减施 10% 养分不会降低氮素吸收积累量。

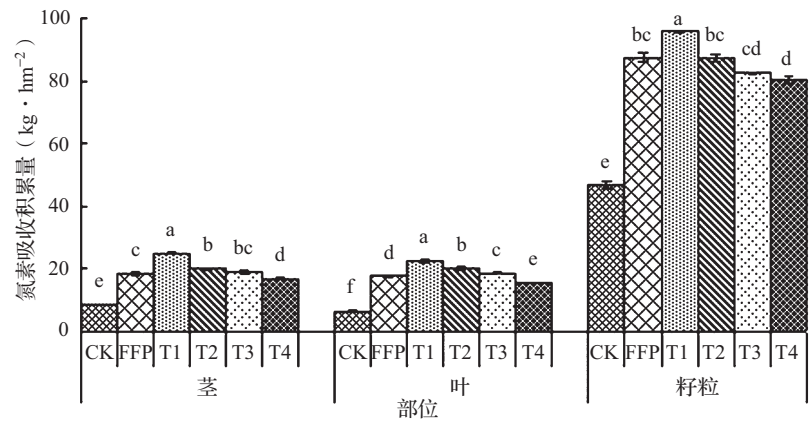


图 3 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位氮素吸收积累量

2.4.3 有机无机复混肥施用下水稻植株氮素吸收利用率

氮肥吸收利用率是评价水稻对氮素吸收利用效果的重要指标, 有机无机复混肥施用下水稻氮肥利用率见表 4, T1 处理氮素吸收利用率和生产 100 kg 籽粒吸氮量显著高于其他处理, 与 FFP 处理相比, 氮素生理利用率显著降低, 土壤氮素依存率处于最低水平; T2 处理氮素生理利用率显著高于其他处理, 氮肥贡献率、氮肥农学利用率均显著高于除 T1 外的其他处理, 且氮肥偏生产力显

著高于 T1 和 FFP 处理, 氮肥吸收利用率显著高于 FFP 处理; T3 和 T4 处理在生产 100 kg 籽粒吸氮量、氮肥农学利用率和氮素生理利用率上均与 FFP 处理无显著差异, 且二者间也无显著差异, 其中 T4 处理氮肥偏生产力和土壤氮素依存率处于最高水平。由此可见, 有机无机复混肥有利于促进水稻的氮素利用, 同时降低了土壤氮素依存率, 同时有机无机复混肥减养分量施用不会降低水稻对氮素的吸收利用, 但是会增加对土壤氮素的依存率。

表 4 有机无机复混肥施用下水稻氮素吸收利用率

处理	生产 100 kg 籽粒吸氮量 (kg)	氮肥吸收利用率 (%)	氮肥贡献率 (%)	氮肥偏生产力 (kg · kg ⁻¹)	氮肥农学利用率 (%)	氮素生理利用率 (kg · kg ⁻¹)	土壤氮素依存率 (%)
CK	1.0c	—	—	—	—	—	—
FFP	1.4b	28.0c	26.1b	39.6c	10.3b	37.0b	50.4c
T1	1.6a	36.9a	27.7ab	40.5c	11.2ab	30.3c	43.6e
T2	1.4b	29.6b	30.7a	42.2b	13.0a	43.8a	49.0d
T3	1.4b	29.4b	25.2b	43.5b	11.0b	37.4b	51.9b
T4	1.4b	28.7bc	21.4c	46.5a	10.0b	34.8b	55.4a

2.5 有机无机复混肥施用对水稻磷素吸收利用的影响

2.5.1 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位磷含量

有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位磷含量见图4, 各施肥处理茎、叶、籽粒的磷含量均高于不施肥处理, 说明施肥可提高水稻茎、叶、籽粒的磷含量。在成熟期, 水稻的磷含量为籽粒>茎>叶。与FFP处理相比, T1处理在茎、叶、籽粒上分别增加了19.6%、89.9%、11.4%, 且达到显著水平; T2处理在茎、叶、籽粒上分别增加了8.9%、34.4%、0.7%, 但在茎、籽粒上无显著性差异; T3处理在茎、叶、籽粒上分别增加了11.3%、28.4%、5.9%, 且在叶和籽粒上达到显著水平; T4处理在叶上增加了18.8%, 但无显著性差异。与T2处理相比, T3处理在茎和叶上无显著差异, 籽粒显著高于T2处理, T4处理在叶和籽粒上无显著差异。表明有机无机复混肥可促进水稻茎、叶、籽粒磷的吸收, 且一次性施肥更有利于磷素吸收, 且有机无机

复混肥养分减施10%和20%不会降低茎、叶、籽粒中磷含量。

2.5.2 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位磷素吸收及其分配

有机无机复混肥施用下水稻植株成熟期不同部位磷吸收积累量如图5所示。成熟期各处理水稻植株地上部磷素吸收积累量在籽粒部分占比达到70%以上, CK处理达到80.9%, 相较FFP、T1、T2、T3和T4处理分别高出1.7%、7.4%、3.6%、2.7%和0.9%, 表明施肥会影响营养器官养分向籽粒转移的量。各施肥处理茎、叶、籽粒的磷吸收积累量均高于不施肥处理, 说明施肥可显著促进水稻茎、叶、籽粒的磷吸收。与FFP处理相比, T1处理在茎、叶、籽粒上分别增加了44.6%、106.1%、19%, 且达到显著水平; T2处理在茎、叶、籽粒上分别增加了5%、31.5%、1%, 且在叶上存在显著性差异; T3处理在茎、叶、籽粒上分别增加了4.6%、23.3%、4.2%, 但无显著差异; T4处理在叶上增加了9.4%, 但无显著性差异。与T2处理相比, T3处理在茎、

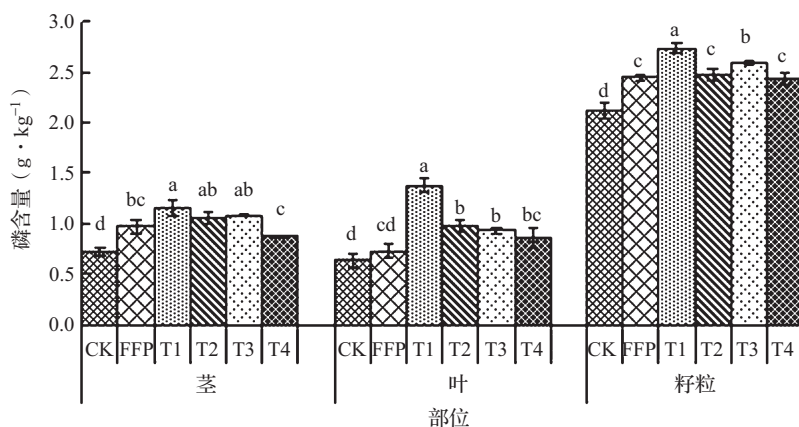


图4 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位磷含量

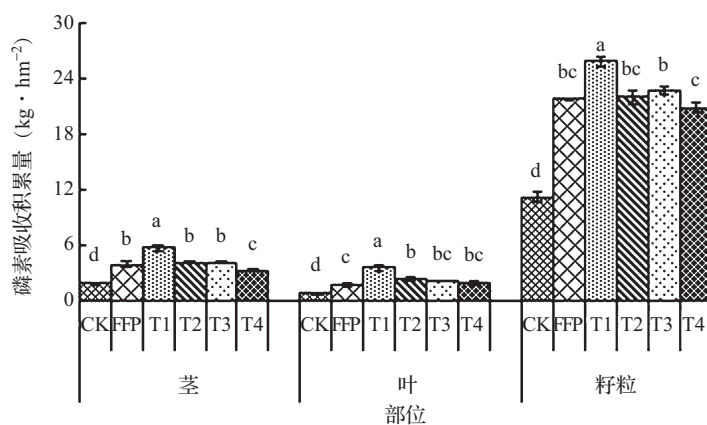


图5 有机无机复混肥施用下水稻植株不同部位磷素吸收积累量



叶、籽粒上均无显著差异, T4 处理在叶和籽粒上无显著差异。表明有机无机复混肥可以促进水稻茎、叶、籽粒磷素吸收, 且有机无机复混肥养分减施 10% 和 20% 不会降低磷素吸收积累量。

2.5.3 有机无机复混肥施用下水稻植株磷素吸收利用率

磷肥吸收利用率是评价水稻对磷素吸收利用效果的重要指标, 有机无机复混肥施用对水稻磷肥利用率的影响见表 5, T1 处理磷肥吸收利用率和生产 100 kg 籽粒吸磷量显著高于其他处理, 土壤磷素依存率显著低于其他处理; T2 处理磷肥农学利用率显著高于其他处理, 且磷肥偏生产力显著高于 T1 和

FFP 处理; 与 FFP 处理相比, T3 处理生产 100 kg 籽粒吸磷量、磷肥吸收利用率、磷肥农学利用率和磷肥偏生产力均显著提高, 土壤磷素依存率显著降低; T4 处理磷肥偏生产力和土壤磷素依存率处于最高水平, 且生产 100 kg 籽粒吸磷量、磷肥吸收利用率、磷肥农学利用率均显著低于 T3 处理, 但 100 kg 籽粒吸磷量和磷肥农学利用率均与 FFP 处理无显著差异。由此可见, 有机无机复混肥有利于促进水稻的磷素吸收利用, 同时降低了土壤氮素依存率, 同时有机无机复混肥减养分量施用不会降低氮素的吸收利用, 但是养分减施 20% 会增加对土壤氮素的依存率。

表 5 有机无机复混肥施用下水稻磷素吸收利用率

处理	生产 100 kg 籽粒吸磷量 (kg)	磷肥吸收利用率 (%)	磷肥偏生产力 (kg · kg ⁻¹)	磷肥农学利用率 (%)	土壤磷素依存率 (%)
CK	0.22d	—	—	—	—
FFP	0.32c	22.7d	144.5c	37.7d	50.5b
T1	0.40a	35.6a	147.6c	40.9b	39.4d
T2	0.31c	24.3cd	154.1b	47.3a	48.8bc
T3	0.34b	28.0b	158.7b	40.1bc	47.9c
T4	0.32c	25.5c	169.8a	36.4d	53.2a

3 讨论

3.1 有机无机复混肥对水稻干物质积累及转运的影响

作物干物质的积累是其产量及品质形成的物质基础, 水稻籽粒灌浆充实度与干物质积累和转运密切相关^[14]。作物在花前干物质积累量是花后籽粒营养的重要来源^[15], 且水稻生育后期, 干物质转移越多, 转运量越大, 则水稻产量越高^[16]。杨胜玲等^[17]研究表明有机、无机肥料配施水稻成熟期地上部干物质积累量显著高于无机化肥处理, 水稻籽粒干物质积累量主要来源于花后干物质积累, 各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率为 50.2% ~ 65.4%, 且配施有机肥各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率显著提高。而本研究结果表明, 与常规复合肥相比, 有机无机复混肥可以促进茎叶干物质向籽粒转运, 养分减量 10% 也不会降低转运量, 且各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率 (62.7% ~ 68.5%) 均高于干物质转运量对籽粒贡献率, 但是有机无机复混肥处理略低于单施化肥处理, 说明施用有机无机复混肥前期生长旺盛, 花

前干物质积累量可持续向籽粒运转提供能源物质, 这可能是因为有机无机复混肥增加了土壤有机质等养分含量, 提升土壤供肥能力, 可使养分持续供应, 有利于作物对养分的均衡吸收, 所以水稻花前干物质增长持续时间较长, 促进植株体内的干物质积累^[18], 因而更有利于增加花前干物质向籽粒的转运。

3.2 有机无机复混肥对水稻养分吸收的影响

协调好作物对养分的吸收和积累利用间的关系是提高作物产量的关键。有研究表明, 有机肥、无机肥配施在一定程度上能够促进水稻植株对氮、磷和钾的吸收^[19]。汤雷雷等^[20]研究表明, 相比无机肥处理, 有机、无机肥配施处理对增加水稻产量、提高水稻对养分的吸收、减少养分盈余以及增加经济效益方面效果更好, 且随着年限的延长, 这种效应越趋明显。尹彩侠等^[21]经过 2 年试验研究发现, 有机肥氮替代 10% 化肥氮水稻氮、磷养分积累量最高, 较常规施肥处理分别增加了 4.6%、13.4%, 有机肥适量替代化肥能够协调水稻对氮、磷养分的吸收与转化, 有利于籽粒的形成。这与本研究结果基本一致, 主要可能是有机、无机肥配施

一方面满足水稻对无机养分的需求,另一方面有机养分又可以调节土壤与肥料养分的释放强度和速率,使水稻各生育阶段得到更为均衡的养分,同时增强了植株的养分吸收能力,提高水稻产量,又减少了养分的流失,达到减肥增效效果^[22]。

3.3 有机无机复混肥对肥料养分利用率的影响

目前,我国粮食生产存在高投入高输出现状,化肥施用量过多,肥料利用率低,可见,合理施肥、提高肥料利用率势在必行。周运陆等^[23]研究表明,施用 25% 有机肥氮替代化肥氮不仅水稻产量最高,还能够显著提高水稻的氮素累积量、氮肥农学利用率、水稻氮肥吸收利用率、氮肥生理利用率及水稻偏生产力。刘红江等^[24]施用 50% 有机肥替代化肥发现,在保证水稻高产的同时,显著增加水稻氮素累积量,并使水稻氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力均得到明显提高。尹彩侠等^[21]发现有机肥氮替代 10% 化肥氮处理的肥料农学利用率、肥料偏生产力、肥料利用率提高幅度最显著。本试验结果显示,有机无机复混肥有利于促进氮磷的吸收利用率、氮磷肥吸收利用率、氮磷肥农学利用率和氮磷肥偏生产力,降低了土壤氮磷依存率,同时有机无机复混肥适当减养分施用不会降低氮磷的吸收利用。这应该是有机无机复混肥有利于土壤氮素有效性的增加,且具有持续性,导致有机无机复混肥施入后使得土壤中养分利用率显著增加^[25]。

4 结论

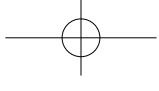
施用有机无机复混肥更有利于提高水稻氮磷吸收,提高水稻产量。与常规施肥相比,在氮磷钾总养分相同的情况下,一次性施用有机无机复混肥处理氮磷肥吸收利用率、氮磷肥农学利用率、氮磷肥偏生产力增加了 8.9% 和 12.9%、0.9% 和 3.2%、0.9 和 3.2 kg · kg⁻¹, 产量增加 2.2%; 在氮肥分次施用情况下,等养分有机无机复混肥处理氮磷肥吸收利用率、氮磷肥农学利用率、氮磷肥偏生产力增加了 1.6% 和 1.6%、2.6% 和 9.6%、2.6 和 9.6 kg · kg⁻¹, 土壤氮磷素依存率降低了 1.4% 和 1.7%, 水稻产量显著增加 6.6%。

氮肥分次施用情况下,氮磷钾养分减施 10% 和 20% 处理与常规施肥处理间水稻产量无显著差异,不会导致水稻明显减产,且在氮磷肥吸收利用率、氮磷肥农学利用率和氮磷肥偏生产力上与常规施肥处理无显著差异,说明减量施用有机无机复混

肥可以替代常规施肥,达到减肥增效的目的。

参考文献:

- [1] 王伟妮,王亚艺,姚忠清,等. 中稻“3414”施肥效果及推荐用量研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(12): 1416-1419.
- [2] Weaver D M, Prout A L. Changing farm practice to meet environmental objectives of nutrient loss to Oyster Harbour [J]. Fertilizer Research, 1993, 36: 177-184.
- [3] 韩宝吉,石磊,徐芳森,等. 湖北省水稻施肥现状分析及评价[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(12): 2430-2435.
- [4] 凌启鸿,张洪程,鞠章网,等. 三安生物有机肥不同用量对有机水稻产量、品质和氮素吸收利用的影响[J]. 中国稻米, 2010, 16(1): 17-22.
- [5] 张振都,吴景贵. 畜禽粪便的资源化利用研究进展[J]. 广东农业科学, 2010, 37(1): 135-138.
- [6] 徐培培,黄娟,陆亮. 施用有机无机复混肥对水稻无机氮肥减量效果的研究[J]. 上海农业科技, 2018(3): 105-106.
- [7] 王新平,曹海华,杨英,等. 水稻减量施用不同品牌有机无机复混肥效益对比试验[J]. 现代农业科技, 2020(6): 13.
- [8] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 99: 1-12.
- [9] 杨旭,刘海林,黄艳艳,等. 有机无机复混肥施用量对热带水稻土壤微生物群落和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 619-629.
- [10] 晏军,王伟义,李斌,等. 秸秆还田下化肥减施对苏北地区水稻产量与氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 74-82.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 卜东升,刘冬碧,肖依波,等. 江汉平原稻区 16 个水稻品种对氮肥的响应及其利用率差异[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1182-1192.
- [13] 刘彦伶,李渝,白怡婧,等. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1146-1156.
- [14] Patra A K, Misshra K N, Garnayak L M, et al. Influence of long-term organic nutrient management on soil quality and crop productivity in rice (*Oryza sativa*)-potato (*Solanum tuberosum*)-okra (*Abelmoschus esculentus*) cropping system under irrigated condition [J]. The Indian Journal of Agronomy, 2017, 62(3): 268-274.
- [15] 徐一兰,唐海明,程爱武,等. 不同施肥模式对大麦-双季稻三熟种植模式中大麦干物质积累、分配及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(2): 64-71, 99.
- [16] 霍中洋,姚义,张洪程,等. 播期对直播稻光合物质生产特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(13): 2592-2606.



- [17] 杨胜玲, 黄兴成, 李渝, 等. 长期有机无机肥配施对水稻生长、干物质积累及产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34 (9): 1815-1825.
- [18] 金磊, 李霞, 魏晓东, 等. 不同氮效率粳稻生育后期产量形成的生理基础[J]. 华北农学报, 2013, 28 (5): 175-186.
- [19] 秦建权, 冯跃华, 叶勇, 等. 有机无机肥配施对杂交水稻干物质生产、养分吸收及产量形成的影响[J]. 中国稻米, 2017, 23 (3): 59-62.
- [20] 汤雷雷, 万开元, 李祖章, 等. 施肥模式对双季稻产量、养分吸收及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (2): 259-268.
- [21] 尹彩侠, 孔丽丽, 李前, 等. 优化施肥条件下有机肥部分替代化肥对水稻产量、养分吸收及转运的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45 (6): 59-63.
- [22] 何欣, 荣湘民, 谢勇, 等. 化肥减量与有机肥替代对水稻产量与养分利用率的影响[J]. 湖南农业科学, 2017 (3): 31-34.
- [23] 周运陆, 张永发, 陈仕迁, 等. 有机-无机肥配施对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. 热带农业科学, 2021, 41 (11): 1-6.
- [24] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017 (5): 61-66.
- [25] 夏瑶, 娄运生, 杨超光, 等. 几种水稻土对磷的吸附与解吸特性研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35 (11): 1379-1384.

Effects of combined application of organic inorganic fertilizer on rice yield and nutrient absorption and utilization

DAI Li¹, HU Cheng^{2*}, WAN Jian-hua¹, XU Hua-lin¹, LIU Mao-jun¹, GUO Wei-hong¹, QIAO Yue¹ (1. Huaqiang Chemical Group Co. Ltd., Yichang Hubei 444100; 2. Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan Hubei 430064)

Abstract: In order to improve the fertilizer utilization rate of rice and reduce the amount of fertilizer application, the application effect of organic inorganic compound fertilizer was studied. Six different fertilization treatments were set up, including no fertilization (CK), conventional fertilization of common compound fertilizer with nitrogen split-application (FFP), equal nutrient organic inorganic compound fertilizer with one-time fertilization (T1), equal nutrient organic inorganic compound fertilizer with nitrogen fertilizer split-application (T2), 90% nutrient organic inorganic compound fertilizer with nitrogen fertilizer split-application (T3), 80% nutrient organic inorganic compound fertilizer with nitrogen fertilizer split-application (T4). The effect of organic inorganic compound fertilizer application on rice yield and nitrogen and phosphorus absorption and utilization was studied. The results showed that the contribution rate of dry matter accumulation to grain after anthesis (62.69%-68.48%) was higher than that of dry matter transport to grain (31.52%-37.33%). The actual yield of each treatment ranked as T2>T1>FFP>T3>T4>CK. The yield of T2 and T1 treatments increased by 6.6% and 2.2%, respectively, while T3 treatment showed no significant difference, compared with FFP treatments. The uptake and accumulation of aboveground nitrogen and phosphorus in the grain of rice in all treatments accounted for more than 65% and 70%, respectively. Compared with FFP treatment, the uptake and utilization rate of nitrogen and phosphorus fertilizer, the agronomic utilization rate of nitrogen and phosphorus fertilizer and the partial productivity of nitrogen and phosphorus fertilizer in T1 treatment increased by 8.9% and 12.9%, 0.9% and 3.2%, 0.9 and 3.2 kg · kg⁻¹, respectively, and those in T2 treatment increased by 1.6% and 1.6%, 2.6% and 9.6%, 2.6 and 9.6 kg · kg⁻¹, respectively, while there was no significant difference in T3 and T4 treatment. Combined application of organic inorganic fertilizer can improve the absorption and utilization rate of nitrogen and phosphorus nutrients. In the case of the same total amount of nitrogen, phosphorus and potassium nutrients, one-time application of organic inorganic compound fertilizer is more conducive to improve the absorption of nitrogen and phosphorus in rice. In the case of split-application of nitrogen fertilizer, the effect of organic inorganic compound fertilizer is more obvious. Proper reduction fertilization will not reduce the yield of rice, but also can reduce the nutrient residue in rice fields.

Key words: organic inorganic compound fertilizer; yield; fertilizer utilization rate; nutrient absorption; dry matter accumulation