

整治稻田水稻生长及水肥利用对不同施肥的短期响应

黄兴成^{1,2,3}, 李 渝^{1,2,3}, 刘彦伶^{1,2,3}, 张雅蓉^{1,2,3},
杨叶华^{1,2,3}, 朱华清^{1,2,3}, 蒋太明^{2,3,4*}

(1.贵州省农业科学院 土壤肥料研究所, 贵阳 550006;

2.国家农业科学土壤质量贵阳观测实验站, 贵阳 550006;

3.农业农村部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006;

4.贵州省农业科学院, 贵阳 550006)

摘 要:【目的】探索不同施肥模式对整治稻田水稻生长及水肥利用的影响, 为整治稻田水肥管理提供科学依据。

【方法】采用盆栽试验方法, 采集 4 个整治稻田供试土壤(S1、S2、S3、S4), 设置 4 种施肥模式(CF 平衡化肥、CF-LM 低量有机肥替代化肥、CF-HM 高量有机肥替代化肥和 CK(对照)不施肥), 研究了不同供试土壤和施肥模式对水稻生长、产量及构成因子、水分利用效率和肥料利用效率的影响。【结果】与 CK 相比, 平衡化肥、低量有机肥替代化肥和高量有机肥替代化肥均能显著增加水稻分蘖数, 提高水稻剑叶长、剑叶宽和剑叶面积。等养分投入条件下, 平衡化肥处理水稻籽粒产量较低量有机肥替代化肥和高量有机肥替代化肥处理显著增加, 平均分别提升了 39.1% 和 175.4%。各处理水稻水分利用效率和肥料利用效率均以平衡化肥处理最高, 其次为低量有机肥替代化肥和高量有机肥替代化肥处理。路径分析显示, 有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量均直接显著促进了水稻籽粒产量建成, 直接路径系数分别为 0.83、0.23、0.14、0.05。【结论】稻田整治后短期施用平衡化肥能够取得较高的水稻产量和水肥利用效率; 施用化肥通过提高水稻分蘖数, 增加有效穗数, 提升水稻籽粒产量。

关 键 词: 整治稻田; 施肥; 产量; 偏生产力; 水分利用效率

中图分类号: S146

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022201

黄兴成, 李渝, 刘彦伶, 等. 整治稻田水稻生长及水肥利用对不同施肥的短期响应[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(Supp.1): 1-6, 12.

HUANG Xingcheng, LI Yu, LIU Yanling, et al. Short-term Response of Rice Growth, Water and Fertilizer Utilization to Different Fertilizer Applications in Land Consolidation Paddy Fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(Supp.1): 1-6, 12.

0 引 言

【研究意义】我国从 1997 年启动土地整治工作, 在全国范围内推进实施了一系列的土地整治工程, 对增加耕地面积, 保障粮食安全做出了重要贡献^[1]。长期以来, 土地整治工程主要强调新增耕地面积, 对耕地质量的关注不够, 造成生态环境破坏和农业水土资源浪费等突出问题, 给农业绿色可持续发展带来严峻挑战^[2]。深入揭示土地整治过程土壤质量问题, 针对

性开展整治土地的综合管理, 对于实现土地由数量为主整治向产能、生态型整治转变具有重要意义。【研究进展】土地整治实施坑塘填埋、田块平整等过程的人为扰动可能在短期内破坏土壤稳定性, 造成土壤物理、化学及微生物质量的降低^[3], 从而降低土地的生产力^[4], 并带来生态环境风险^[5]。其中, 稻田由于长期水耕栽培, 形成了质地黏重、养分量低的犁底层^[6], 整治平整过程将犁底层土壤翻耕至耕作层, 造成耕层土壤有机质、全氮等养分量降低^[7], 土壤容重和硬度增加^[8], 孔隙度降低, 是稻田整治过程生产力降低的主要因素^[9]。因此, 学者指出, 必须通过合理的耕作管理, 改善稻田整治过程对土壤和水稻长势造成的短期干扰^[9]。科学合理的施肥是实现水稻高产和水肥高效利用的重要管理措施^[10]。贵州是全国唯一没有平原

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 贵州省科学技术基金项目(黔科合基础[2020]1Y411); 国家自然科学基金项目(31860132); 中央引导地方科技发展专项资金项目(黔科中引地[2019]4003 号)

作者简介: 黄兴成(1990-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事农田生态研究。E-mail: huangxc90@163.com

通信作者: 蒋太明(1964-), 男, 研究员, 博士, 主要从事农田水土工程研究。E-mail: jtm532@163.com

的省份,人均耕地较少,耕地破碎,开展土地整治项目逐步提高耕地数量,改善耕地质量,对于该地区实现高质量发展和保障经济民生至关重要^[11]。然而,该地区长期以来土地整治形式单一,以土地平整为主,造成土壤板结,整治稻田土壤质量差,农田生产力较低^[12]。【切入点】且当前对于整治稻田短期科学合理的施肥模式仍然缺乏系统研究,不同施肥模式改善整治稻田水稻产量的关键机制尚不明确。【拟解决的关键问题】为此,本研究拟通过综合评估短期不同施肥模式对贵州山区整治稻田水稻生长及水肥利用的影响,为该区域整治稻田水稻生产提供科学的水肥管理策略。

表 1 供试土壤基础性质

Table 1 Basic properties of soils

供试土壤	pH 值	有机质量/(g kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)	碱解氮量/(mg kg ⁻¹)	有效磷量/(mg kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)
S1	6.88	37.08	0.234	186	8.8	214
S2	6.85	43.23	0.267	214	25.3	253
S3	7.05	42.84	0.260	190	18.8	186
S4	6.60	53.79	0.285	220	18.6	252

1.2 试验设计

试验在贵州省农业科学院内农业农村部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站试验场完成。采用盆栽试验方法,共设置 3 个施肥处理和 1 个对照不施肥处理(CK),施肥处理为:平衡化肥(CF)、低量有机肥替代化肥(CF-LM)、高量有机肥替代化肥(CF-HM),每个处理重复 3 次。供试土壤经风干、过筛后装盆(直径 20 cm×高度 20 cm),每盆装土壤 5 kg。除 CK 不施任何肥料,其他各处理按等养分投入设计,每盆施入等量的氮(N, 0.72 g/plot)、磷(P₂O₅, 0.36 g/plot)、钾(K₂O, 0.36 g/plot),相当于当地习惯施肥 N、P₂O₅ 和 K₂O 为 160、80 和 80 kg/hm²。试验于 2019 年 4 月 30 日育秧,6 月 11 日移栽。基肥于 6 月 11 日移栽前施入,穗肥于 8 月 1 日孕穗期施入。各处理施肥模式见表 2。

表 2 各处理施肥量

Table 2 Fertilizers application rates in each treatments

处理	基肥/(g plot ⁻¹)				穗肥/(g plot ⁻¹)	
	有机肥	尿素	过磷酸钙	氯化钾	尿素	氯化钾
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CF	0.00	1.38	3.02	0.30	0.20	0.30
CF-LM	4.50	1.04	2.27	0.23	0.20	0.30
CF-HM	18.10	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30

1.3 测定项目和方法

1.3.1 水稻生长

水稻抽穗初期,调查水稻分蘖数;水稻齐穗后,测定株高,同时测定主穗剑叶长和剑叶宽,用剑叶长×

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采集自贵州省贵阳市花溪区内经土地平整深翻的 4 个稻田内,土壤类型均为水稻土黄泥田土种,土壤主要基础性质见表 1。供试水稻品种为茂优 601,属籼型三系杂交水稻。供试肥料为尿素(含 N 46.0%),过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.0%),氯化钾(含 K₂O 60.0%)和商品有机肥(干基含 N 3.5%,P₂O₅ 2.0%,K₂O 1.0%)。

剑叶宽×0.75 计算剑叶面积^[13];采用叶绿素分析仪(SPAD-502)测定主穗剑叶 SPAD 值。

1.3.2 水稻产量及其构成因子

水稻成熟期,各盆分别测产,记录有效穗数后脱粒,将籽粒分开为饱粒和瘪粒,分别统计其数量,在 80 °C 烘箱烘干至恒质量,称量各部分干质量,计算穗粒数、结实率、千粒质量和籽粒产量。

1.3.3 水肥利用效率

水稻从移栽到籽粒黄熟,当盆钵水分降低至略见土壤初露时浇水至盆钵水满,记录灌水量(L)。分别计算水分利用效率^[14]和肥料利用效率^[15]:

$$WUE=Y/I, \quad (1)$$

$$PFP=Y/F, \quad (2)$$

式中:WUE 为水分利用效率(kg/m³);PFP 为肥料利用效率(kg/kg);Y 为水稻籽粒产量(g/plot);I 为耗水量(L/plot);F 为 N+P₂O₅+K₂O 养分总量(g/plot)。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 软件整理数据和绘图。采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,LSD 法进行多重比较(P<0.05)。采用 AMOS 21.0 进行路径分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥对水稻生长的影响

供试土壤及施肥处理对水稻生长影响的双因素方差分析结果见表 3。不同供试土壤间水稻剑叶长和

剑叶面积差异极显著，各施肥处理间水稻分蘖数、株高、剑叶长、剑叶宽和 *SPAD* 值差异极显著，水稻剑叶长、剑叶面积和 *SPAD* 值受供试土壤和施肥处理的交互影响。

由表 3 可知，水稻分蘖数在各供试土壤间差异未达显著水平 ($P>0.05$)；各施肥处理间水稻分蘖数的差异极显著，所有供试土壤下，与 CK 相比，施肥均显著增加了水稻分蘖数，其中以 CF 处理水稻分蘖数最多，其次是 CF-LM 处理和 CF-HM 处理。供试土壤

对株高的影响不显著，施肥处理对水稻株高的影响极显著，各施肥处理水稻株高以 CK 最低，CF 处理和 CF-LM 处理最高。供试土壤、施肥处理及其交互作用均极显著影响了水稻剑叶长；与 CK 相比，供试土壤 S1、S3、S4 的各施肥处理 (CF、CF-LM、CF-HM) 剑叶长均显著增加。各供试土壤下，水稻剑叶宽、剑叶面积和 *SPAD* 值均以 CF 处理和 CF-LM 处理显著高于 CF-HM 处理和 CK。

表 3 不同施肥对水稻生长的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on rice growth							
供试土壤	施肥处理	分蘖数/(个 plot ⁻¹)	株高/cm	剑叶长/cm	剑叶宽/cm	剑叶面积/cm ²	<i>SPAD</i> 值
S1	CK	2.7±1.2 c	69.7±2.7 b	13.1±2.5 b	1.0±0.1 c	9.6±2.3 b	20.6±9.3 b
	CF	17.7±3.2 a	87.4±4.2 a	18.8±1.9 a	1.4±0.2 a	19.3±3.2 a	41.7±2.8 a
	CF-LM	9.3±0.6 b	87.5±4.6 a	18.8±0.6 a	1.3±0.1 ab	17.9±1.8 a	29.5±13.0 ab
	CF-HM	7.0±0.0 b	80.9±3.9 a	20.0±1.5 a	1.1±0.1 bc	16.5±2.3 a	24.5±5.3 b
S2	CK	2.7±1.2 d	65.7±1.5 c	15.6±1.4 b	0.9±0.1 b	10.5±1.5 b	18.7±6.8 b
	CF	16.3±3.2 a	87.5±3.1 a	22.1±3.2 a	1.5±0.2 a	24.4±4.7 a	38.5±1.2 a
	CF-LM	11.0±1.0 b	84.7±4.5 a	20.8±4.9 ab	1.4±0.1 a	22.5±6.6 a	38.8±6.1 a
	CF-HM	6.3±0.6 c	77.2±3.8 b	21.3±2.4 ab	1.1±0.1 b	17.0±1.7 ab	27.0±4.9 b
S3	CK	3.7±0.6 b	65.9±2.4 c	14.8±0.9 c	0.9±0.1 b	10.3±0.5 b	31.6±0.8 a
	CF	15.7±1.5 a	91.3±1.3 a	30.4±3.9 a	1.6±0.2 a	37.6±9.2 a	26.0±2.5 b
	CF-LM	14.7±3.2 a	90.6±3.4 a	30.8±2.2 a	1.5±0.2 a	34.0±5.6 a	24.6±0.8 b
	CF-HM	6.3±0.6 b	79.1±2.5 b	22.7±1.2 b	1.2±0.1 b	19.9±1.9 b	25.2±1.2 b
S4	CK	3.7±0.6 b	72.3±5.3 b	15.9±1.6 b	0.9±0.1 c	11.2±2.0 c	29.9±2.5 ab
	CF	16.0±1.0 a	91.5±6.8 a	25.9±3.0 a	1.4±0.1 a	27.1±2.7 a	29.4±4.0 ab
	CF-LM	14.7±3.8 a	89.2±2.8 a	22.5±0.8 a	1.4±0.1 a	23.6±2.0 ab	35.4±4.9 a
	CF-HM	6.3±0.6 b	77.5±4.9 b	22.7±2.9 a	1.2±0.1 b	20.0±4.4 b	27.2±4.1 b
供试土壤		1.186	2.234	17.368**	2.364	12.665**	1.266
施肥		124.147**	76.152**	35.595**	52.707**	42.256**	7.694**
供试土壤×施肥		2.086	0.922	3.485**	1.030	2.808*	4.256**

注 *表示差异显著 ($P<0.05$)，**表示差异极显著 ($P<0.01$)；同列不同字母表示同一供试土壤各施肥处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 不同施肥对水稻耗水量的影响

水稻生育期耗水量受供试土壤、施肥处理及二者交互作用的极显著影响见图 1。图 1 中“S”表示供试土壤，“F”表示施肥处理；*表示差异显著 ($P<0.05$)，**表示差异极显著 ($P<0.01$)；不同字母表示同一供试土壤不同施肥处理间差异显著 ($P<0.05$)。由图 1 可知，在供试土壤 S1、S2、S3 条件下，水稻生育期耗水量均以 CF 处理最高，其次是 CF-LM 处理，CF-HM 处理耗水量显著高于 CK。供试土壤 S4 条件下，CF 处理和 CF-LM 处理耗水量差异不显著，显著高于 CF-HM 处理，CK 耗水量最低。

2.3 不同施肥对水稻产量及其构成因子的影响

供试土壤及施肥模式显著影响了水稻产量及其

构成因子 (图 2)。水稻籽粒产量、有效穗数、穗粒数和结实率受施肥模式、供试土壤及二者交互作用的极显著影响，千粒质量受短期施肥处理的显著影响。

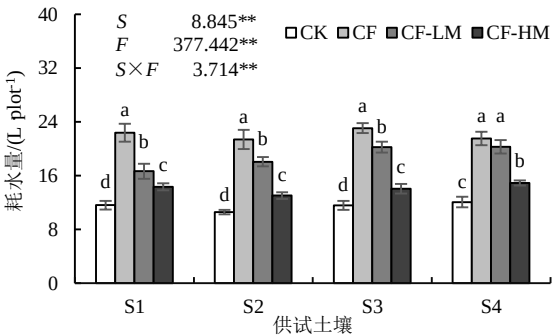


图 1 各施肥处理水稻耗水量特征

Fig.1 Water consumption of different fertilization treatments

不同施肥处理下水稻产量差异显著(图2)。与CK相比,短期平衡化肥处理(CF)、有机肥替代化肥处理(LM-CF、HM-CF)水稻籽粒产量均显著增加,平衡化肥(CF)、低量有机肥替代化肥(LM-CF)和高量有机肥替代化肥(HM-CF)处理籽粒产量分别提升了575%、385%和145%。不同施肥处理间有效穗数差异显著,各供试土壤均以平衡化肥(CF)处理最高,其次是低量有机肥替代化肥处理(CF-LM),供试土壤S1、S2、S3下高量有机肥替代化肥处理(CF-HM)有效穗数显著高于CK。各施肥处理间水稻穗粒数差异显著,供试土壤S1、S3以CF处理和CF-LM处理最高,其次是CF-HM处理,CK最低;

供试土壤S2各施肥处理(CF、CF-LM、CF-HM处理)间水稻穗粒数差异不显著,显著高于CK;供试土壤S4各施肥处理间水稻穗粒数差异显著,以CF处理>CF-LM处理>CF-HM处理>CK。供试土壤S2和S3下各处理水稻结实率差异不显著;供试土壤S1下CK水稻结实率显著高于CF-HM处理,CF处理和CF-LM处理结实率最低;供试土壤S4下CK和CF-HM处理水稻结实率显著高于CF处理和CF-LM处理。各施肥处理间水稻千粒质量变异无显著规律性。整体而言,水稻籽粒产量和有效穗数以短期平衡化肥处理(CF)最高,CK最低。

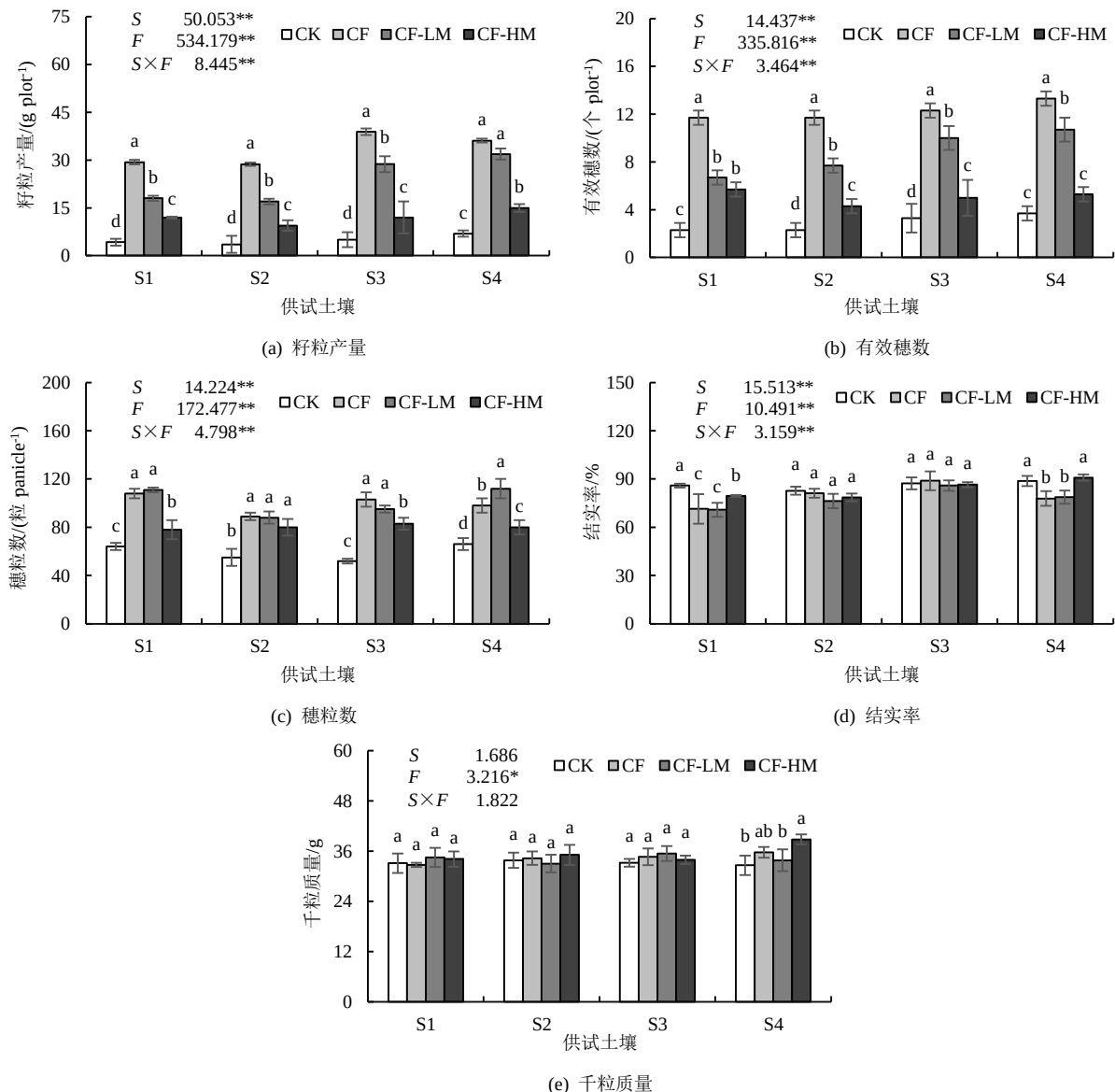


图2 不同施肥对水稻产量及其构成因子的影响

Fig.2 Effect of different fertilization on rice grain yield and its composition factors

2.4 不同施肥对水稻水肥利用效率的影响

水稻水分利用效率(WUE)和肥料利用效率(PFP)受供试土壤、施肥处理及二者交互作用的显著影响(图3)。供试土壤S1、S4条件下,CF处理和CF-LM

处理水稻水分利用效率差异不显著,显著高于CF-HM处理;供试土壤S2、S3条件下,水稻水分利用效率以CF处理>CF-LM处理>CF-HM处理。各供试土壤(S1、S2、S3、S4)下肥料利用效率均以CF

处理最高,分别为 20.3、19.8、26.8 kg/kg 和 24.9 kg/kg; 供试土壤 S1、S2、S3 条件下 CF-LM 处理和 CF-HM 处理肥料利用效率显著降低; 供试土壤 S4 的 CF-LM 处理比 CF 处理肥料利用效率略有降低, 但不显著。

2.5 水稻产量的影响因素分析

路径分析表明, 整治稻田短期内施用化肥直接促进了水稻分蘖数、株高、剑叶面积和 SPAD 值的提升, 直接路径系数分别为 0.93、0.89、0.76 和 0.49; 施用

有机肥显著提升了水稻株高和剑叶面积, 直接路径系数为 0.26 和 0.22。水稻分蘖数与有效穗数和穗粒数正相关, 与结实率显著负相关。水稻株高与穗粒数正相关, 与结实率负相关。剑叶面积直接正向促进了有效穗数、结实率和千粒质量提升。有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量均直接正向促进了水稻籽粒产量建成, 直接路径系数分别为 0.83、0.23、0.14、0.05 (图 4)。

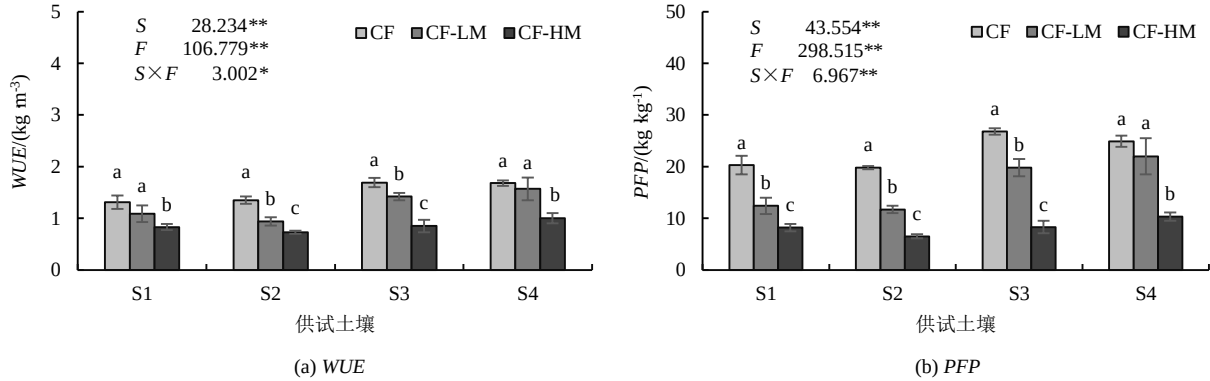
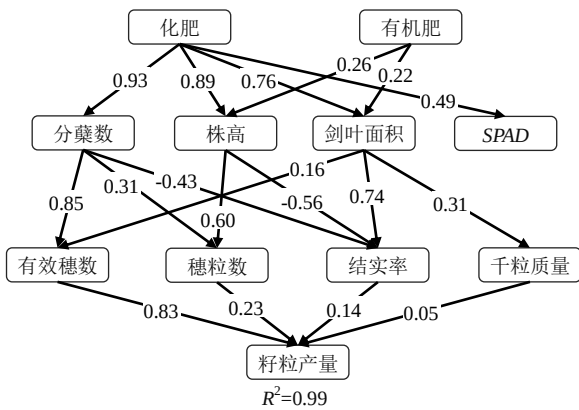


图 3 各处理水稻水分利用效率和肥料利用效率

Fig.3 Water use efficiency and fertilizer utilization of different fertilization in rice



注 线上数字表示路径系数 (P < 0.05), R² 为模型拟合优度

图 4 不同施肥对水稻生长和产量的路径分析

Fig.4 Pathway analysis of different fertilization on rice growth and grain yields

3 讨论

科学合理的施肥是保障水稻高产和水肥高效利用的重要耕作管理措施。不施肥或偏施化肥会导致土壤肥力降低, 从而造成水稻减产^[16]; 平衡施用化肥能够促进水稻生长和产量形成, 但对土壤肥力的持续提升效果较施用有机肥差^[17]; 施用有机肥能够显著提升稻田土壤肥力^[18], 但是短期内有机肥替代化肥比例过高会导致水稻减产^[19]。稻田整治中平整和深翻过程造成了耕作层土壤的扰动, 短期内土壤肥力显著下降, 对水稻高产和水肥高效利用造成严重干扰, 科学合理的施肥对改善稻田整治过程对土壤和水稻长势造成

的短期干扰具有重要的意义。本研究探讨了短期平衡化肥和有机肥替代化肥等模式对整治稻田水稻生长及水肥利用的影响, 研究指出在盆栽条件下整治稻田短期内不施肥水稻产量较低, 施肥能够显著促进水稻生长, 提升水稻产量和水肥利用效率; 等养分投入下以平衡化肥模式水稻产量和水肥利用效率最高, 有机肥替代化肥处理水稻产量和水肥利用率有所降低 (图 2、图 3)。值得注意的是, 本研究采用盆栽试验方法, 未考虑深翻稻田田间条件下土壤层次结构破坏造成的水分和养分渗漏, 未来需要进一步解析田间条件下不同施肥模式对整治稻田水稻生长及水肥利用的综合效益, 并结合其他耕作措施以减少速效养分的渗漏和环境破坏^[20]。对于不同施肥处理的增产效益, 有效穗数是水稻产量形成的最大贡献因子^[21]。本研究也发现, 水稻产量与有效穗数直接关联性最强, 施用化肥有利于水稻分蘖数的提升, 促进水稻有效穗数形成, 从而提升水稻产量 (图 4)。因此, 整治稻田水肥管理的首要任务是保障水稻分蘖生长需求。水稻生长前期的养分供应对于分蘖和有效穗形成具有重要作用, 其中氮是水稻分蘖形成的关键养分, 直接影响了有效穗数形成^[22]。施用氮肥能够明显促进水稻分蘖芽的萌发和生长, 增加分蘖数; 氮供应不足会导致水稻分蘖芽的伸长受到抑制^[23]。整治稻田一般土壤供氮能力较低, 采用速效氮肥能够快速供应水稻氮素营养, 有利于水稻分蘖形成。相较平衡化肥处理, 有机肥替代化肥各处理水稻分蘖数较低, 主要原因可能是有机肥养分释放较慢^[24], 尤其是有机肥中氮以大分

子有机氮为主^[25],采用有机肥替代化肥可能导致速效氮供应不足,导致水稻分蘖数降低,从而减少穗数形成,降低水稻产量^[26]。因此,整治稻田短期平衡施用速效化肥,保证水稻生育前期充足的养分供应,提升水稻分蘖和有效穗,是保障水稻高产的必要策略。

4 结 论

1) 本研究条件下,整治稻田短期施用平衡化肥能够取得较高的水稻产量和水肥利用效率。

2) 施用化肥主要通过直接促进水稻分蘖数增长,提高水稻有效穗数和穗粒数,促进水稻籽粒产量建成。

参考文献:

- [1] 严金明,夏方舟,李强. 中国土地综合整治战略顶层设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 1-9.
- [2] 王军,钟莉娜. 土地整治工作中生态建设问题及发展建议[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 308-314.
- [3] 卜长利,李裕瑞,王永生,等. 土地整治对土壤的影响: 研究进展与展望[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2020, 5(2): 32-39.
- [4] 谷晓坤,范春晓,柴铎,等. 不同类型区农用地整治对农田生产能力的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 745-753.
- [5] 刘世梁,侯笑云,张月秋,等. 基于生态系统服务的土地整治生态风险评价与管控建议[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(3): 193-200.
- [6] 张君,刘目兴,易军,等. 不同植稻年限土壤剖面基本性质与水-氮分布的关系[J]. 土壤, 2019, 51(6): 1 188-1 195.
- [7] 周秀梅. 不同机械化整地技术对稻田土壤理化性质和水稻产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(14): 200-202.
- [8] 王秋菊,焦峰,韩东来,等. 机械化整地方式对低洼水田土壤理化性质及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 70-77.
- [9] 李肖肖,朱凤武,许桃元,等. 苏南农田土壤性状和水稻长势对土地整治的短期响应[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 571-581.
- [10] CAO X C, WU L L, LU R H, et al. Irrigation and fertilization management to optimize rice yield, water productivity and nitrogen recovery efficiency[J]. Irrigation Science, 2021, 39, 235-249.
- [11] 李博,何腾兵,刘忠斌,等. 贵州土地整治研究的回顾和展望[J]. 浙江农业科学, 2014(4): 562-565, 568.
- [12] 肖红燕,刘弢,任海利,等. 贵州喀斯特地区绿色土地整治实现途径浅析[J]. 国土与自然资源研究, 2020(6): 42-47.
- [13] 彭伟业,孙平勇,潘素君,等. 水稻品种魔王谷粒形、剑叶性状和株高 QTL 定位[J]. 作物学报, 2018, 44(11): 1 673-1 680.
- [14] 孟翔燕,周凌云,张忠学,等. 不同灌溉模式对水稻生长、水分和辐射利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 285-292.
- [15] 刘杰云,邱虎森,张文正,等. 灌溉方式及生物质炭对冬小麦产量及水肥利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 59-65.
- [16] 李忠芳,张水清,李慧,等. 长期施肥下我国水稻土基础地力变化趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1 394-1 402.
- [17] 戴竞雄,王飞. 长期施肥对南方黄泥田水稻养分吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 189-196.
- [18] 周卫军,陈建国,谭周进,等. 不同施肥对退化稻田土壤肥力恢复的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 29-35.
- [19] 石鑫蕊,任彬彬,江琳琳,等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 154-162.
- [20] 王瑾瑜,程文龙,槐圣昌,等. 深翻、有机无机肥配施对稻田水分渗漏和氮素淋溶的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(20): 4 385-4 395.
- [21] HUANG M, ZOU Y B, JIANG P, et al. Relationship between grain yield and yield components in super hybrid rice[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(10): 1 537-1 544.
- [22] 汪洋. 氮素营养对水稻分蘖的产量异质性影响及调控[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [23] LIU Y, GU D D, DING Y F, et al. The relationship between nitrogen, auxin and cytokinin in the growth regulation of rice (*Oryza sativa* L.) tiller buds[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, 5(8): 1 019-1 026.
- [24] 赵明,赵征宇,蔡葵,等. 畜禽有机肥料当季速效氮磷钾养分释放规律[J]. 山东农业科学, 2004(5): 59-61.
- [25] LYU D A, YAN B X, WANG L X, et al. Changes in phosphorus fractions and nitrogen forms during composting of pig manure with rice straw[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(10): 1 855-1 864.
- [26] 廖萍,汤军,黄山,等. 等养分条件下生物有机肥与化肥配施对双季稻产量和土壤性状的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(2): 16-20.

(下转第 12 页)