

# 有机无机肥配施锌肥和石灰对双季稻产量及土壤养分特性的影响

马国柱, 屠乃美, 方畅宇, 易镇邪, 杨晶, 谭志新, 黎鹏, 董一漩

(湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

**摘要:** 在南方典型双季稻种植区, 通过2年试验综合评价在有机无机肥配施基础上施用锌肥和石灰对双季稻产量与土壤养分特性的影响, 以期提出培肥土壤和提高水稻产量的理想施肥模式。设置有机肥+无机肥(T1)、锌+有机肥+无机肥(T2)、石灰+有机肥+无机肥(T3)、锌+石灰+有机肥+无机肥(T4)4个处理, 测定了土壤有效锌、碱解氮、有效锌含量和pH, 分析了水稻产量和土壤综合肥力。结果表明:(1)相比T1处理, T2处理显著提高了早晚稻千粒重和结实率, 显著增产8.7%, 而T3处理不利于水稻稳产, 显著降低了千粒重, 并在第2年减产(5.6%)显著; T4处理表现出来的产量规律与T3处理类似, 均于第2年表现减产。(2)施用锌肥、石灰均有利于提高土壤有效磷和碱解氮含量, 石灰显著提高土壤pH, 但T3、T4处理土壤有效锌含量显著下降, 较T1处理分别下降39.0%和31.9%, 而连年施用锌肥有利于有效锌的提高, T2较T1处理土壤有效锌含量提高22.2%。(3)土壤综合肥力表现为T2>T4>T1>T3, 施用锌肥相比石灰更有利于提高土壤肥力。综上所述, 施用锌肥能显著提高土壤速效养分含量, 增产显著, 而连年施用石灰显著降低了土壤中有效锌含量。因此, 在缺锌土壤中需慎施石灰, 而长期施用石灰的土壤, 应追施锌肥。综合土壤养分含量和水稻产量评价, 有机+无机+锌肥的施肥模式为理想施肥模式。

**关键词:** 锌肥; 石灰; 有效锌; 土壤肥力; 水稻产量

**中图分类号:**S158.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1009-2242(2020)04-0171-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.026

## Effects of Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers with Zinc Fertilizer and Lime on Yield and Soil Nutrient Characteristics of Double Cropping Rice

MA Guozhu, TU Naimei, FANG Changyu, YI Zhenxie,

YANG Jing, TAN Zhixin, LI Peng, DONG Yixuan

(College of Agronomy of Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

**Abstract:** The effects of zinc fertilizer and lime on double-season rice yield and soil nutrient characteristics were evaluated in a typical double-season rice growing area in southern China, in order to propose the best fertilization mode for fertilizing local soil and increasing rice yield. It is equipped with organic fertilizer + inorganic fertilizer (T1), zinc + organic fertilizer + inorganic fertilizer (T2), lime + organic fertilizer + inorganic fertilizer (T3), zinc + lime + organic fertilizer + inorganic fertilizer (T4), a total of 4 treatments. The indicators of soil available zinc, alkali nitrogen, available zinc, and pH were determined, and rice yield and soil comprehensive fertility were analyzed. The results showed that: (1) Compared with T1 treatment, T2 treatment significantly increased the 1000-grain weight and seed setting rate of early and late rice, and significantly increased yield by 8.7%. However, the application of lime (T3) in successive years was not conducive to stable yield of rice, significantly reduced 1000-grain weight, and significantly reduced yield in the second year (5.6%). The yield pattern exhibited by the T4 treatment was similar to that of the T3 treatment, and both showed a reduction in production in the second year. (2) The application of zinc fertilizer and lime was beneficial to increasing the content of available phosphorus and alkali nitrogen in soil. Lime could also significantly increase soil pH, but

the effective zinc content in T3 and T4 treatments decreased significantly, which was 39.0% and 31.9% lower than that of T1 treatment. However, the application of zinc fertilizer for several years was conducive to the improvement of effective zinc. The effective zinc content of T2 was 22.2% higher than that of T1 treatment. (3) The soil comprehensive fertility was T2>T4>T1>T3, the application of zinc fertilizer was more conducive to improving soil fertility than lime. In summary, the application of zinc fertilizer can significantly increase the soil available nutrient content, and increase production. However, the application of lime in successive years significantly reduced the effective zinc content in the soil. Therefore, lime should be applied cautiously in zinc-deficient soil, and for the long-term application of lime, attention should be paid to the supplement of exogenous zinc fertilizer. Based on comprehensive evaluation of soil nutrient content and rice yield, the fertilization mode of organic-inorganic + zinc fertilizer is the best fertilization mode.

**Keywords:** zinc fertilizer; lime; available zinc; soil fertility; rice yield

近年来,为了追求作物高产,盲目施用无机化肥,忽视了有机肥和中微肥的施用;加之高产品种和多熟制的推广,不仅使土壤中微量元素缺乏,土壤肥力下降明显,给粮食安全带来不可忽视的影响。

湖南省作为我国最重要的水稻生产大省之一,其产量直接影响我国粮食安全。如何科学施肥,在维持和提高土壤肥力水平基础上,提高养分利用率和水稻产量是人们长期以来关注的问题。大量研究<sup>[1-3]</sup>表明,有机无机肥配施不仅能够有效提高土壤有机质含量,增加土壤养分含量和土壤有益微生物数量,还能改善水稻生理特性,提高作物产量。锌作为植物必需微量元素,对作物产量的提高和品质的改善具有重要作用。目前,我国土壤缺锌现状日趋严重,缺锌土壤面积达 4 866.7 万  $\text{hm}^2$ <sup>[4]</sup>,大约占耕地面积的 40%<sup>[5]</sup>。王孝忠等<sup>[6]</sup>通过统计 1970—2013 年间相关研究表明,锌肥通过土壤施用、叶面喷施和种子处理在水稻上的平均增产率分别为 15.0%,9.8% 和 9.7%,土施锌肥的施用量在 30  $\text{kg}/\text{hm}^2$  增产效果较好。锌肥还有利于作物次生根的发生和根系的良好发育,在增加土壤有效锌含量和植株内锌含量的同时,还能调节氮代谢生理功能,有利于吸收土壤中养分,提高土壤养分含量<sup>[7-8]</sup>。石灰作为一种良好的酸性改良剂,不仅能提高土壤 pH<sup>[9]</sup>,还能显著提高土壤中的有效磷含量<sup>[10]</sup>。以往在有机肥施用比例、锌肥施用方法及植株锌含量等方面研究较多,但对有机肥、锌肥和石灰 3 种肥料综合研究相对较少。本研究以湖南浏阳地区典型红壤水稻土为供试土壤,研究有机无机肥配施基础上增施锌肥和石灰对水稻产量和土壤养分特性的影响,为本地区肥料合理施用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试早稻品种为“中早 39”,供试晚稻品种为“泰优 390”。

供试肥料:无机肥中氮肥为尿素(N,46%),磷肥

为过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$ ,12%),钾肥为氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$ ,60%);有机肥为湖南省湘晖农业技术开发有限公司生产的菜籽饼,氮的质量分数(以烘干基计)为 6.9%;五氧化二磷的质量分数(以烘干基计)为 1.2%;氧化钾的质量分数(以烘干基计)为 2.6%;有机质的质量分数(以烘干基计)为 80.2%;中微肥为硫酸锌(纯锌含量为 20.5%)和石灰(熟石灰)。

### 1.2 试验设计

试验于 2017—2018 年 4—10 月连续 2 年在湖南农业大学浏阳市河东农场实习基地( $113^{\circ}83'46''\text{E}$ , $28^{\circ}30'93''\text{N}$ )进行。土壤为水稻土,pH 6.1,有机质含量 24.4  $\text{g}/\text{kg}$ ,全氮(N)含量 1.15  $\text{g}/\text{kg}$ ,全磷(P)含量 0.61  $\text{g}/\text{kg}$ ,碱解氮含量 149.0  $\text{mg}/\text{kg}$ ,有效磷含量 36.5  $\text{mg}/\text{kg}$ ,速效钾含量 132.6  $\text{mg}/\text{kg}$ ,有效锌含量 0.75  $\text{mg}/\text{kg}$ 。早晚稻均采取同样的施肥方式进行试验。试验分别设置 4 个处理:T1(30% 有机肥+70% 无机肥)、T2(锌肥+30% 有机肥+70% 无机肥)、T3(石灰+30% 有机肥+70% 无机肥)和 T4(锌肥+石灰+30% 有机肥+70% 无机肥)。其中 30% 表示 30% 的 N 以有机肥的形式施入,相对于纯无机肥处理不足的氮磷钾以无机化肥的形式施入。每季作物收获后,秸秆全量还田。各处理等氮、磷、钾施入,其他处理中相对纯无机肥处理氮磷钾量不足的采用无机肥尿素、过磷酸钙和氯化钾补足。各处理 3 次重复,采用随机区组设计,小区面积为 128.25  $\text{m}^2$ (9.5 m×13.5 m),早稻株行距为 14 cm×21 cm,晚稻株行距为 17 cm×25 cm。

2 年的双季早稻均于 4 月 6 日播种,4 月 28 日机插秧;双季晚稻试验于 6 月 21 日播种,7 月 23 日机插秧。每个试验小区筑田埂(宽 20 cm,高 30 cm),并用塑料薄膜包裹,防止小区间肥、水互渗,各个小区单排单灌。水稻季各处理氮肥按 5:3:2 分基肥(犁田前 1 天)、分蘖肥(移栽后 10 天)和穗肥(幼穗分化第 3 期)3 次施用。钾肥按 5:5 分基肥(犁田前 1 天)、分蘖肥(移栽后 10 天)2 次施用。锌肥、磷肥、有机肥

和石灰全作为基肥施入。病虫害等其他田间管理同

一般大田。具体施肥方案见表1。

表1 早晚季试验肥料用量

单位:kg/hm<sup>2</sup>

处理	基肥					分蘖肥		穗肥
	菜籽饼	尿素	过磷酸钙	氯化钾	硫酸锌	尿素	氯化钾	尿素
T1	652	114	561	111		69	111	46
T2	652	114	561	111	30	69	111	46
T3	652	114	561	111		1500	69	111
T4	652	114	561	111	30	1500	69	111

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分含量 选取水稻生长的5个关键时期(早稻最高分蘖期4月28日、晚稻最高分蘖期8月10日、早稻孕穗期5月18日、晚稻孕穗期9月8日、早稻齐穗期6月3日、晚稻齐穗期9月20日、早稻乳熟期6月28日、晚稻乳熟期10月5日和早稻成熟期7月10日、晚稻成熟期10月20日),每个处理3次重复取样,每重复采用“五点”取样法取深度为20 cm土样。自然风干后,碾碎、过筛,测定土壤碱解氮、有效磷、有机质(成熟期)、有效锌(成熟期)含量;有效锌采用DTPA-TEA浸提-AAS法;有机质含量采用重铬酸钾加热法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用HCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>法测定<sup>[11]</sup>。

1.3.2 水稻生长发育特性 水稻茎蘖动态:从返青后,在每个小区前、中、后各选取20株水稻植株,每5天数1次茎蘖数,数至孕穗期,之后于齐穗期、乳熟期、成熟期取样时数茎蘖数。

1.3.3 水稻产量构成 成熟期每小区前、中、后分别调查连续20蔸的有效穗数,计算单穴有效穗数,然后每小区按平均有效穗数前、中、后各取5蔸,带回实验室考察每穗粒数、结实率和千粒重。于每个处理3次重复,分别选取5 m<sup>2</sup>的植株样,测定实际籽粒产量。

### 1.3.4 数据处理

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{x}{x_a} & x \leq x_a \\ 1 + \frac{x - x_a}{x_c - x_a} & x < x \leq x_c \\ 2 + \frac{x - x_c}{x_p - x_c} & x_c < x \leq x_p \\ 3 & x > x_p \end{cases}$$

式中:IFI<sub>i</sub>为养分肥力系数;x为土壤有机质(g/kg)、碱解氮(mg/kg)、有效磷(mg/kg)测定值;x<sub>a</sub>与x<sub>p</sub>为分级标准下、上限;x<sub>c</sub>为介于分级标准上、下限间;属性值分级标准(x<sub>a</sub>、x<sub>p</sub>、x<sub>c</sub>)主要参考第二次全国土壤普查标准<sup>[12-14]</sup>(表2)。

利用修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力:

$$IFI = \sqrt{\frac{(IFI_{i\text{平均}})^2 + (IFI_{i\text{最小}})^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$$

式中:IFI为土壤综合肥力;IFI<sub>i</sub>平均与IFI<sub>i</sub>最小为土壤各属

性分肥力平均值与最小值;n为评价指标个数<sup>[15]</sup>。

表2 土壤各属性分级标准

分级	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )
x <sub>a</sub>	20	90	10
x <sub>c</sub>	30	120	20
x <sub>p</sub>	40	150	40

采用Excel 2016、SPSS 20.0软件进行数据整理统计和分析,方差分析采用Duncan法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 锌肥和石灰对双季稻产量及产量构成的影响

由图1可知,相比T1处理,施用锌肥的T2处理早晚稻产量显著提高8.7%,而施用石灰的T3处理水稻产量降低5.6%,且2018年减产达显著水平;锌肥和石灰混合施用的T4处理,在2017年水稻产量呈显著上升,但在2018年水稻产量低于T1处理。进一步分析水稻产量构成(表3),相比T1处理,除2018年晚稻外,施用锌肥的T2处理显著提高了早晚稻千粒重和结实率,而施用石灰的T3处理显著降低了千粒重。

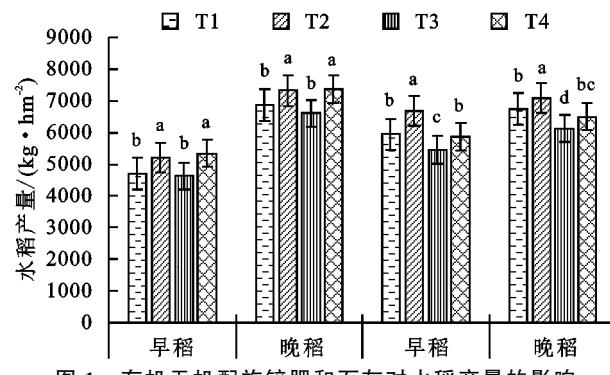


图1 有机无机配施锌肥和石灰对水稻产量的影响

### 2.2 锌肥和石灰对水稻土壤碱解氮含量的影响

从表4可以看出,2017年早稻(分蘖期、孕穗期、齐穗期、乳熟期、成熟期)5个关键时期均为T4处理最高,而2017年晚稻除分蘖盛期和孕穗期为T2处理最高外,齐穗期、成熟期均为T4处理最高。2018年早稻除乳熟期和成熟期为T2处理最高外,分蘖盛期、孕穗期、齐穗期均为T4处理最高,晚稻5大关键时期均以T2处理最高。表明锌肥和石灰混合施用(T4)处理在第1年土壤碱解氮含量高于锌肥和石灰单施各处理,但第2年,则表现出T2>T4>T3的规律。

律。由此可知,施用有机肥和锌肥均能增加土壤中碱解氮含量,为水稻生长发育提供充足氮来源,且以施

用有机肥和锌肥提升幅度最大;而连年施用石灰,第 2 年晚稻降低了土壤中的碱解氮含量。

表 3 有机无机配施锌肥和石灰对水稻产量构成的影响

年份	水稻种类	处理	有效穗( $\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ )	穗粒数	结实率/%	千粒重/g
2017	早稻	T1	333.0 $\pm$ 4.2b	101 $\pm$ 0.8a	59.0 $\pm$ 3.1c	24.37 $\pm$ 0.1c
		T2	333.2 $\pm$ 3.6b	91 $\pm$ 3.3b	69.9 $\pm$ 1.2a	25.01 $\pm$ 0.3ab
		T3	414.3 $\pm$ 3.1a	93 $\pm$ 0.9b	52.4 $\pm$ 1.1d	23.99 $\pm$ 0.2d
		T4	354.6 $\pm$ 6.2b	101 $\pm$ 6.8a	60.7 $\pm$ 4.0b	25.46 $\pm$ 0.2a
	晚稻	T1	346.5 $\pm$ 5.9a	113 $\pm$ 1.1a	72.7 $\pm$ 3.5b	24.47 $\pm$ 0.3b
		T2	337.5 $\pm$ 6.1a	115 $\pm$ 0.7a	77.1 $\pm$ 1.5a	24.68 $\pm$ 0.2a
		T3	336.0 $\pm$ 1.8a	110 $\pm$ 0.9a	73.0 $\pm$ 1.0b	24.31 $\pm$ 0.1c
		T4	354.6 $\pm$ 3.1a	114 $\pm$ 1.0a	76.4 $\pm$ 4.1a	24.71 $\pm$ 0.3a
2018	早稻	T1	358.5 $\pm$ 4.4a	106 $\pm$ 2.6a	63.5 $\pm$ 4.1c	24.79 $\pm$ 0.1c
		T2	366.4 $\pm$ 0.8a	106 $\pm$ 2.1a	68.3 $\pm$ 4.4a	25.13 $\pm$ 0.4b
		T3	358.5 $\pm$ 6.1a	92 $\pm$ 1.8b	67.2 $\pm$ 3.8ab	24.65 $\pm$ 0.2d
		T4	366.0 $\pm$ 3.0a	94 $\pm$ 1.6b	68.2 $\pm$ 3.3a	25.21 $\pm$ 0.1a
	晚稻	T1	309.0 $\pm$ 4.1a	115 $\pm$ 1.6b	78.1 $\pm$ 3.2a	24.33 $\pm$ 0.6b
		T2	319.5 $\pm$ 3.8a	121 $\pm$ 2.7a	75.0 $\pm$ 2.6c	24.63 $\pm$ 0.1a
		T3	291.3 $\pm$ 2.4b	118 $\pm$ 1.4a	74.6 $\pm$ 2.0c	24.10 $\pm$ 0.4c
		T4	292.5 $\pm$ 1.7b	121 $\pm$ 0.4a	76.7 $\pm$ 4.1ab	24.13 $\pm$ 0.3c

注:同年同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

表 4 有机无机配施锌肥和石灰对土壤碱解氮含量的影响

单位:mg/kg

年份	处理	早稻					晚稻				
		分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	乳熟期	成熟期	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	乳熟期	成熟期
2017	T1	151.5a	135.4b	168.9b	—	140.2c	164.3a	126.6b	156.6c	—	150.3b
	T2	152.6a	138.4b	172.6b	—	150.2b	171.1a	144.0a	170.9b	—	167.3a
	T3	139.9b	142.4b	148.8c	—	141.8c	165.1a	130.7b	159.4c	—	165.7a
	T4	159.0a	152.9a	183.9a	—	153.8a	165.7a	141.6a	188.7a	—	168.0a
2018	T1	146.6c	137.1b	135.5c	138.3a	150.2b	138.2b	122.0b	132.4b	130.7a	131.7b
	T2	149.4c	138.9b	139.6ab	142.0a	161.4a	150.4a	127.5a	143.1a	131.0a	139.6a
	T3	152.6ab	136.8b	138.8ab	129.1b	158.0a	127.2c	122.7b	127.7c	125.4b	122.6c
	T4	159.5a	150.5a	142.0a	141.4a	160.4a	139.3b	126.9a	134.4b	130.7a	136.6a

### 2.3 锌肥和石灰对水稻土壤有效磷含量的影响

由表 5 可知,在水稻 5 个生育期中,2 年早稻各处理中 T4 处理土壤有效磷含量最高,T1 处理最低。除 2018 年早稻齐穗期和乳熟期,相比 T1 处理,T4 处理提高 65.7% (64.2%~67.3%)。施锌肥的处理达到显著水平,且均以 T4 处理最高,施石灰的 T3、T4 处理有效磷含量均显著高于未施石灰的 T1、T2 处理。2 年晚稻处理中,分蘖盛期为 T4 处理有效磷含量最高,到成熟期有效磷含量与施锌和有机肥的各处理与早稻表现出相同规律,施石灰 T3、T4 处理有效磷含量与早稻表现相同规律,且显著高于未施石灰的 T1、T2 处理。由此可知,施用有机肥、锌肥和石灰均能不同程度提高有效磷含量,以施用锌肥的处理提高幅度最大。

### 2.4 锌肥和石灰对水稻土壤有效锌含量的影响

由图 2 可知,成熟期各施肥处理土壤中有效锌含量均表现出 T2>T1>T4>T3 的规律。相比 T1 处理,T2 处理有利于提高土壤中有效锌含量,在 2018 年达显著水平,提高 22.2%。而施用石灰的 T3 和 T4 处理显著降低了土壤中有效锌含量,下降幅度分别为 39.0% 和 31.9%。综上所述,施用石灰能显著降低土壤中有效锌含量,而施锌肥能显著提高土壤中有效锌含量。

### 2.5 锌肥和石灰对水稻土壤 pH 的影响

由表 6 可知,施用石灰有利于提高土壤 pH,且与未施石灰处理相比达显著水平。施用石灰处理中以 T4 处理土壤 pH 最高,相比 T1 处理,早晚稻 pH 平均提高 0.31 个单位。

## 2.6 锌肥和石灰对水稻土壤有机质含量的影响

从图3可知,2年早晚稻各施肥对土壤有机质含量均以施锌肥处理最高,均以未施锌肥处理最低。

表5 有机无机配施锌肥和石灰对土壤有效磷含量的影响

单位:mg/kg

年份	处理	早稻					晚稻				
		分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	乳熟期	成熟期	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	乳熟期	成熟期
2017	T1	34.3c	25.2d	36.4c	—	28.6c	21.9d	16.0c	25.0c	—	27.0c
	T2	48.4a	34.5c	41.1b	—	33.8b	42.3b	25.3b	41.8b	—	38.4b
	T3	46.5ab	41.1a	44.3ab	—	35.6b	29.9c	28.00b	37.0b	—	40.1b
	T4	51.0a	45.6a	47.8a	—	41.4a	47.1a	43.7a	55.0a	—	43.3a
2018	T1	16.0d	12.2c	24.6c	24.4b	19.5b	11.7c	14.5c	21.9c	21.0b	20.9c
	T2	25.5b	22.1b	29.5b	25.4b	22.1b	20.3b	20.8b	24.6b	22.1b	22.3c
	T3	21.1c	18.8b	23.8c	22.4b	22.3b	20.1b	23.3b	26.5b	22.1b	25.5b
	T4	39.0a	31.9a	36.1a	41.7a	35.8a	32.8a	36.3a	41.8a	39.5a	36.4a

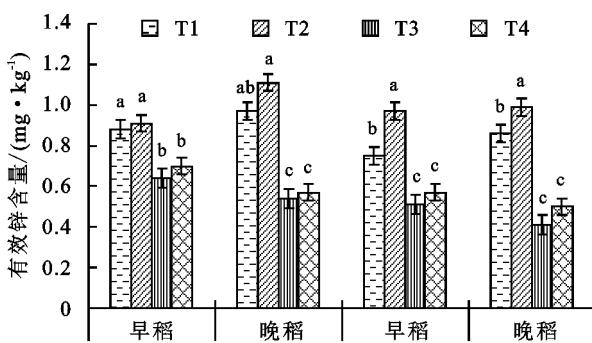


图2 有机无机肥配施锌肥和石灰对水稻成熟期土壤有效锌含量的影响

表6 有机无机配施锌肥和石灰对双季稻成熟期土壤pH的影响

年份	双季稻	T1	T2	T3	T4
2017	早稻	6.27b	6.23b	6.43a	6.45a
	晚稻	6.30b	6.25b	6.48a	6.50a
2018	早稻	6.34b	6.30b	6.78a	6.81a
	晚稻	6.33b	6.31b	6.61a	6.70a

注:同行不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

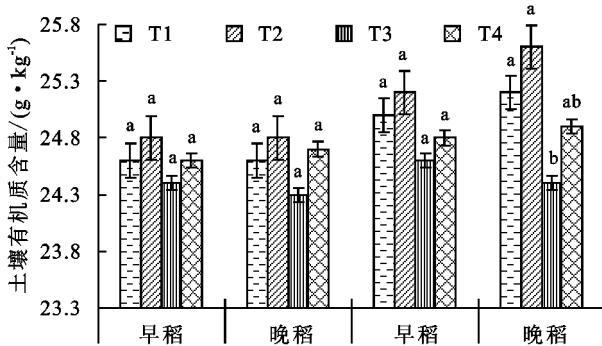


图3 有机无机肥配施锌肥和石灰对水稻成熟期土壤有机质含量的影响

## 2.7 锌肥和石灰对双季稻土壤综合肥力的影响

在农业生产过程中通常选用土壤有机质、氮、磷、钾等养分指标来衡量土壤肥力高低。本研究监测了土壤有机质、碱解氮和有效磷3个指标作为参评指标,综合评价土壤肥力状况。利用内梅罗指数法计

2018年早稻比2017年早稻各施肥处理的土壤有机质含量增加0.81%~1.62%,2018年晚稻比2017年晚稻各施肥处理土壤有机质增加0.41%~3.20%。

表5 有机无机配施锌肥和石灰对土壤有效磷含量的影响

单位:mg/kg

年份	处理	早稻					晚稻				
		分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	乳熟期	成熟期	分蘖盛期	孕穗期	齐穗期	乳熟期	成熟期
2017	T1	34.3c	25.2d	36.4c	—	28.6c	21.9d	16.0c	25.0c	—	27.0c
	T2	48.4a	34.5c	41.1b	—	33.8b	42.3b	25.3b	41.8b	—	38.4b
	T3	46.5ab	41.1a	44.3ab	—	35.6b	29.9c	28.00b	37.0b	—	40.1b
	T4	51.0a	45.6a	47.8a	—	41.4a	47.1a	43.7a	55.0a	—	43.3a
2018	T1	16.0d	12.2c	24.6c	24.4b	19.5b	11.7c	14.5c	21.9c	21.0b	20.9c
	T2	25.5b	22.1b	29.5b	25.4b	22.1b	20.3b	20.8b	24.6b	22.1b	22.3c
	T3	21.1c	18.8b	23.8c	22.4b	22.3b	20.1b	23.3b	26.5b	22.1b	25.5b
	T4	39.0a	31.9a	36.1a	41.7a	35.8a	32.8a	36.3a	41.8a	39.5a	36.4a

算各处理土壤综合肥力指数(IFI),IFI值越大,表示土壤肥力越好。由图4可知,4个处理表现为T2>T4>T1>T3的规律,且T2处理显著高于其他各处理,说明有机无机配施+锌肥的施肥模式更有利提高土壤肥力。

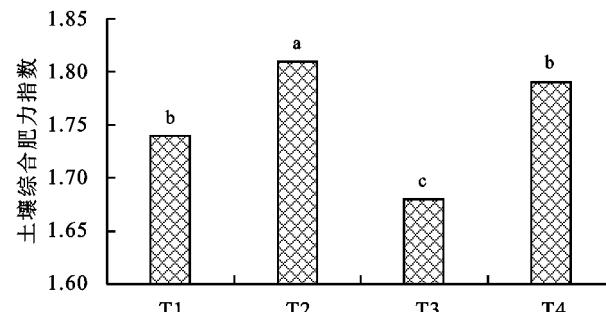


图4 有机无机肥配施锌肥和石灰对水稻土壤综合肥力指数的影响

## 3 讨论

### 3.1 有机无机肥配施锌肥和石灰对水稻产量及产量构成的影响

在中国约有40%的土壤缺锌<sup>[5]</sup>,国内外研究<sup>[16-18]</sup>表明,在缺锌土壤中施用锌肥能显著提高作物产量。刘铮<sup>[19]</sup>根据土壤供锌情况和作物对缺锌的敏感程度,将中国锌肥的应用分为了3个区:锌肥显效区(土壤有效锌<0.5 mg/kg)、锌肥有效区(0.5~1.0 mg/kg)和可能有效区;郭九信等<sup>[20]</sup>研究却表明,锌肥的施用对水稻产量的影响不显著,这可能是由于该研究点的土壤有效锌含量为1.42 mg/kg,不属于缺锌土壤,锌可能并不是影响水稻增产的最小限制因子。本研究表明,有机无机肥配施锌肥(T2)能显著提高水稻产量,相比T1处理增产8.7%。从产量构成角度分析可知,施用锌肥提高了千粒重和结实率。其原因可能为:本试验土壤有效锌含量为0.75 mg/kg,属缺锌土壤,施用锌肥后能为水稻生长补充锌元

素,从而促进水稻各部分的正常吸收与生长;锌与碳水化合物形成相关,且锌主要存在于根细胞和叶绿素内,能增强作物的抗性,提高结实率和千粒重<sup>[21]</sup>。石灰作用一种运用最广泛的酸性改良剂,可有效抵抗土壤酸化,缓解 Al 和其他重金属毒害<sup>[22]</sup>,促进水稻对养分的吸收,从而使水稻增产<sup>[23]</sup>。但也有研究<sup>[24]</sup>表明,长期施用石灰会导致土壤有机质含量下降,显著提高土壤的消化作用,导致水稻产量减产。本研究发现,有机无机配施石灰的第 1 年,水稻产量下降不显著,但在种植第 2 年,T3 处理较 T1 处理减产 5.6%,主要降低了水稻千粒重。其减产原因可能是施入石灰后提高土壤 pH,但同时施用石灰会显著降低土壤中有效锌含量,千粒重的降低可能与土壤锌含量降低有关。本试验表明,有机无机肥配施石灰和锌肥的 T4 处理,水稻产量表现出在第 1 年增产,但到第 2 年减产。因此在实际生产中,对于缺锌的土壤,不宜连年施用石灰,而对于长期用石灰进行酸化改良的土壤,应适当追施锌肥。

### 3.2 有机无机肥配施锌肥和石灰对稻田土壤养分特性的影响

氮磷钾是植株生长所必需营养元素,而土壤中速效养分是被水稻直接吸收利用的养分存在形式<sup>[25]</sup>。2 年研究表明,与 T2 处理相比,T1 处理早晚稻土壤碱解氮含量显著上升 8.0% (7.3%~8.7%),土壤中有效磷也有提高。这可能是因为锌和氮、磷之间存在互作效应,能促进土壤中氮磷向有效态转化,从而提高土壤中速效养分含量<sup>[26]</sup>;且施用锌肥的 T2 处理土壤中有效锌含量较 T1 处理,2018 年提高 22.2%,达显著水平,这与魏义长等<sup>[27]</sup>研究结果相同,施用锌肥能显著提高缺锌土壤有效锌含量。本试验证明,施用石灰的 T3 处理,显著提高了土壤中 pH 和有效磷含量,较 T1 处理,土壤中有效磷含量提高 27.4%。产生这种现象的原因可能是锌肥施入土壤后,锌与磷存在协同作用,促进了无效磷向有效磷的转化,但具体机理还有待进一步研究。但施用石灰显著降低了土壤中有效锌含量,T3 和 T4 处理较 T1 处理分别下降 39.0% 和 31.9%。其原因可能是 Zn 和 Ca 元素之间存在螯合作用<sup>[28]</sup>。褚天铎等<sup>[29]</sup>研究表明,土壤高 pH 是造成土壤缺锌的主要原因,因此在土壤 pH 较高和土壤有效锌含量越低的土壤上施用锌肥,水稻增产效果越明显,但锌与钙之间机理还有待进一步研究。有机无机肥配施锌肥和石灰的 T4 处理,土壤中有效磷和 pH 显著高于其他各处理,特别是土壤中有效磷含量,相比 T1 处理提高 65.7% (64.2%~67.3%)。

说明在提高土壤有效磷方面,Zn 和 Ca 元素间存在明显的协同作用,且石灰相比锌肥更有利于提高土壤中有效磷含量。根据全国第二次土壤普查土壤养分<sup>[12-14]</sup>含量分级表,利用修正的内梅罗公式,计算出土壤综合肥力,以此反映土壤肥力情况。土壤综合肥力指数值越大,表示土壤肥力越好<sup>[30]</sup>。4 个处理土壤综合肥力指数表现出 T2>T4>T1>T3 的规律,且 T2 处理显著高于其他各个处理。

综上所述,有机无机配施锌肥通过培肥土壤,提高土壤速效养分含量从而达到增产目的,从水稻增产和培肥效应来看,30% 有机 + 70% 无机肥 + 锌肥的施肥模式为最佳施肥模式。而施用石灰的处理,显著降低了土壤中有效锌含量,锌成为该土壤限制产量的主要因素,从而导致水稻减产。在现实生产中,对于酸化严重、土壤有效磷含量较低的田块,可配施石灰。对于长期施用石灰的田块,应注重配施锌肥,且不宜连年施用石灰。

## 4 结论

(1) 有机无机配施锌肥提高土壤速效养分含量和土壤综合肥力指数,增加了水稻千粒重和结实率,实现增产。

(2) 连年有机无机配施石灰虽能提高土壤有效磷和 pH,但显著降低了土壤中有效锌含量、千粒重,在施用第 2 年减产明显。

(3) 锌肥和石灰混合施用,提高碱解氮和有效磷含量表现出协同作用,但有效锌含量显著降低,第 2 年水稻减产。

综上,从土壤培肥和增产效应来看,30% 有机 + 70% 无机肥 + 锌肥的施肥模式为理想施肥模式。连年施用石灰的土壤应注意外源锌肥的补充。

## 参考文献:

- [1] 林清美,廖超林,戴齐,等.长期施肥与地下水位对红壤性水稻土微团聚体及其分形特征的影响[J].土壤通报,2018,49(6):1397-1404.
- [2] 方畅宇,屠乃美,张清壮,等.不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J].土壤,2018,50(3):462-468.
- [3] 吴萍萍,李录久,耿言安,等.耕作与施肥措施对江淮地区白土理化性质及水稻产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):243-248.
- [4] 李庆達,朱兆良,于天仁.中国农业持续发展中的肥料问题[M].江西:江西科学技术出版社,1998.
- [5] Yang X E, Chen W R, Feng Y. Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-

- plant system: China as a case study[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, 29(5): 413-428.
- [6] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 998-1004.
- [7] 郭九信, 廖文强, 孙玉明, 等. 锌肥施用方法对水稻产量及籽粒氮锌含量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(2): 185-192.
- [8] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 等. 施锌对小麦开花后氮、磷、钾、锌积累和运转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 313-320.
- [9] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(26): 109-112.
- [10] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 土壤改良剂对鄱阳湖区潜育性稻田的改良作用研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1448-1454.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [12] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [13] 席承藩, 章士炎. 全国土壤普查科研项目成果简介[J]. *土壤学报*, 1994, 31(3): 330-335.
- [14] 施建平, 宋歌. 中国土种数据库—基于第二次土壤普查的全国性土壤数据集[J]. *中国科学数据*, 2016(2): 1-12.
- [15] 潘义宏, 顾毓敏, 夏贤仁, 等. 有机肥与化肥配施对土壤微生物及烟叶品质的影响[J]. *江西农业学报*, 2019, 31(1): 30-36.
- [16] Hossain M A, Jahiruddin M, Islam M R, et al. The requirement of zinc for improvement of crop yield and mineral nutrition in the maize-mung bean-rice system [J]. *Plant and Soil*, 2008, 306: 13-22.
- [17] Potarzycki J, Grzebisz W. Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components [J]. *Plant Soil Environment*, 2009, 55(12): 519-527.
- [18] 董瑜皎, 袁江, 吕世华. 2 个氮水平下不同施锌方式对覆膜水稻产量及锌吸收的影响[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(8): 1655-1661.
- [19] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. *中国农业科学*, 1994, 27(1): 30-37.
- [20] 郭九信, 隋标, 商庆银, 等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1336-1342.
- [21] Slaton N A, Wilson C E, N tamatungiro S J. Development of a critical Mehlich 3 soil-test zinc value for rice. *Rice Research Studies* [M]. Arkansas: Agricultural Experiment Station, 2000: 412-420.
- [22] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 206-213.
- [23] 王秀斌, 唐栓虎, 荣勤雷, 等. 不同措施改良反酸田及水稻产量效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 404-412.
- [24] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3 种改良剂对不同土壤—水稻系统中 Cd 行为的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 834-840.
- [25] 方华舟, 项智锋. 水稻秸秆堆沤肥对优质水稻产量及质量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(1): 62-70.
- [26] 胡时友, 刘凯, 马朝红, 等. 中微量元素肥料配合施用对水稻产量和品质的影响[J]. *农村经济与科技*, 2016, 27(23): 84-86.
- [27] 魏义长, 白由路, 杨俐萍, 等. 测土推荐施锌对水稻产量结构及土壤有效养分的影响[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 197-202.
- [28] 廖伟, 舒芳靖, 左业华, 等. 烤烟锌肥施用技术研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2015(7): 148-150, 154.
- [29] 褚天铎, 刘新保, 王淑惠, 等. 小麦施锌肥效果及使用技术的研究[J]. *土壤肥料*, 1987(4): 24-26.
- [30] 李建军. 我国粮食主产区稻田土壤肥力及基础地力的时空演变特征[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

(上接第 170 页)

- [20] 侯西勇, 孙希华. 土地资源生产力评价及粮食生产潜力估算: 以长清县为例[J]. *地球信息科学*, 2001, 3(2): 60-65.
- [21] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 107-112.
- [22] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [23] Li Y Y, Zhang F B, Yang M Y, et al. Effects of

- adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil[J]. *Catena*, 2019, 173: 226-233.
- [24] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 979-984.
- [25] Gul S, Whalen J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 1-15.