

## 磷肥减量与有机替代对露地辣椒产量品质及土壤肥力的影响

廖广丞, 陈晓萍, 余烨颖, 曹雪仙, 陈文伟, 王远帆, 高闻哲, 李廷强

### 引用本文:

廖广丞, 陈晓萍, 余烨颖, 曹雪仙, 陈文伟, 王远帆, 高闻哲, 李廷强. 磷肥减量与有机替代对露地辣椒产量品质及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 617-626.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0445>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783-1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

#### 洱海流域不同有机肥替代对土壤理化性质及油菜产量的影响

万辰, 马瑛骏, 张克强, 王风, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2494-2502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1026>

#### 氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响

杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 马林英, 杨乖成, 韩艳云, 同延安

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 631-639 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1160>

#### 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 124-133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

#### 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响

刘灿, 秦鱼生, 赵秀兰

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1494-1502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

廖广丞, 陈晓萍, 余焯颖, 等. 磷肥减量与有机替代对露地辣椒产量品质及土壤肥力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 617-626.

LIAO G C, CHEN X P, YU Y Y, et al. Effects of phosphorus reduction and organic substitution on yield, quality, and soil fertility of open-field pepper[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 617-626.



开放科学 OSID

# 磷肥减量与有机替代对露地辣椒产量品质及土壤肥力的影响

廖广丞<sup>1</sup>, 陈晓萍<sup>2</sup>, 余焯颖<sup>2</sup>, 曹雪仙<sup>2</sup>, 陈文伟<sup>2</sup>, 王远帆<sup>1</sup>, 高闻哲<sup>1</sup>, 李廷强<sup>1\*</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院农业化学研究所, 杭州 310012; 2. 浙江省天台县农业技术推广总站, 浙江 台州 317200)

**摘要:**为制定长期高氮高磷投入背景下浙江省露地辣椒产区减肥增效方案,本研究采用田间试验探究了化学磷肥减量与有机肥替代对露地辣椒产量品质及土壤肥力的影响。试验以“萧新系列”辣椒为材料,设置5个处理:不施肥对照(CK)、常规施肥(CF)、化学磷肥减量30%(OF)、化学磷肥减量30%+有机肥替代15%化肥氮(OF-15N)、化学磷肥减量30%+有机肥替代30%化肥氮(OF-30N)。结果表明:OF、OF-15N和OF-30N处理较CF处理产量分别提高3.20%、14.59%和12.21%,扣除肥料成本的效益分别提高3.37%、15.21%和12.84%;与CF处理相比,OF、OF-15N和OF-30N处理辣椒糖酸比提高0.50~2.28,改善辣椒可溶性糖、糖酸比等营养品质指标,尤其在提高钙、镁、铁、锌等中微量元素含量方面效果显著,且OF-15N和OF-30N处理产量品质提升效果优于OF处理;相较于CF处理,OF、OF-15N和OF-30N处理的土壤pH值、土壤有机质和全氮均有不同程度的提升,而土壤有效磷供应水平并未显著下降;与试验前相比,OF、CF和CK处理土壤综合肥力指数值(IFI)有所下降,而OF-15N和OF-30N处理的IFI均有所提升,且OF-30N处理的提升效果优于OF-15N处理。综合来看,在化学磷肥减量30%的基础上,通过有机肥替代30%化肥氮处理对露地辣椒产量品质及土壤肥力的提升效果显著,可作为露地辣椒的减肥增效方案。

**关键词:**磷肥减量;有机肥替代;露地辣椒;产量品质;土壤肥力

中图分类号:S641.3;S158 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0617-10 doi:10.11654/jaes.2023-0445

## Effects of phosphorus reduction and organic substitution on yield, quality, and soil fertility of open-field pepper

LIAO Guangcheng<sup>1</sup>, CHEN Xiaoping<sup>2</sup>, YU Yeying<sup>2</sup>, CAO Xuexian<sup>2</sup>, CHEN Wenwei<sup>2</sup>, WANG Yuanfan<sup>1</sup>, GAO Wenzhe<sup>1</sup>, LI Tingqiang<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Chemistry, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China; 2. Agricultural Technology Extension Station of Tiantai County, Zhejiang Province, Taizhou 317200, China)

**Abstract:**To develop a scheme for reducing chemical fertilizer and improving efficiency in open-field pepper-producing areas, under the backdrop of long-term high nitrogen and phosphorus input in Zhejiang Province, this study investigated the effects of reducing chemical phosphorus fertilizer and replacing it with organic fertilizer on open-field pepper yield, quality, and soil fertility in a field experiment. The experiment utilized “Xiaoxin series” pepper as the primary material, and included five treatments: no fertilizer as control (CK), conventional fertilizer (CF), 30% chemical phosphorus fertilizer reduction (OF), 30% chemical phosphorus fertilizer reduction + organic fertilizer substitution for 15% nitrogen of chemical fertilizer (OF-15N), and 30% chemical phosphorus fertilizer reduction + organic fertilizer substitution for 30% nitrogen of chemical fertilizer (OF-30N). The results demonstrated that: The yield in OF, OF-15N and OF-

收稿日期:2023-06-08 录用日期:2023-12-12

作者简介:廖广丞(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤改良与安全利用。E-mail:22014153@zju.edu.cn

\*通信作者:李廷强 E-mail:litq@zju.edu.cn

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2022C02022,2022C02018);天台县绿色种养循环农业技术服务项目(TCCG-2021-072)

Project supported: The Key Research and Development Project of Zhejiang Pvince, China (2022C02022, 2022C02018); The Project of Green Planting and Recycling Agriculture in Tiantai County, China (TCCG-2021-072)

30N treatments increased by 3.20%, 14.59%, and 12.21%, respectively, compared with the CF treatment, and the benefit after deducting fertilizer cost increased by 3.37%, 15.21%, and 12.84%, respectively; The sugar-acid ratio of open-field pepper grown under OF, OF-15N, and OF-30N treatments increased by approximately 0.50–2.28 relative to the CF treatment, leading to improved nutritional quality indices of soluble sugar and sugar-acid ratio, particularly in terms of the increased content of minor and trace elements, including calcium, magnesium, iron, and zinc; Consequently, the open-field pepper yield and quality in OF-15N and OF-30N treatments were apparently higher than in OF treatment; Soil pH value, soil organic matter, and total nitrogen increased to varying degrees in OF, OF-15N, and the OF-30N treatments compared to the CF treatment, while no significant decrease in soil available phosphorus supply capacity was observed; The soil comprehensive fertility index (IFI) observed in the OF-15N and OF-30N treatments was increased, but it was slightly decreased in the OF, CF, and CK treatments when compared with the pre-experiment treatment. The OF-30N treatment showed greater improvement than OF-15N. In summary, based on a 30% reduction in chemical phosphorus fertilizer, organic fertilizer substitution for 30% nitrogen of chemical fertilizer (OF-30N) treatment has a prominent effect on improving the yield, quality, and soil fertility of open-field pepper. It could be a viable scheme for reducing chemical fertilizer and improving efficiency.

**Keywords:** phosphorus fertilizer reduction; organic fertilizer substitution; open-field pepper; yield and quality; soil fertility

辣椒在全国各地均有生产,是我国种植面积最大的蔬菜之一<sup>[1]</sup>。2022年,我国辣椒种植面积约223万 $\text{hm}^2$ ,总产量约6400万吨,年产值超2700亿元<sup>[2]</sup>。浙江省台州市天台县是典型的露地辣椒高产区,近年来,由于蔬菜产业化和市场化不断扩大,氮磷等化学肥料的投入也越来越高。根据对浙江省天台县蔬菜施肥情况调查结果,过量施肥已经造成土壤磷富集,导致土壤酸化、病虫害加剧等一系列问题,故目前迫切需要一种可大面积推广的绿色施肥技术。事实上,我国蔬菜地普遍存在过量施用化肥的问题,根据黄绍文等<sup>[3]</sup>调查研究,我国蔬菜化肥总养分用量平均为 $1\ 092.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,是全国农作物化肥养分用量的3.3倍;蔬菜N和 $\text{P}_2\text{O}_5$ 施用量分别是各自推荐量的1.9~2.7倍和5.4~5.9倍。Yan等<sup>[4]</sup>研究发现,过量磷输入导致土壤有效磷(Olsen-P)显著富集,全国温室和露地蔬菜地表层土壤(0~20 cm)Olsen-P含量平均为 $179.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $100.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,远超菜地推荐水平( $46.0\sim 58.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

目前,围绕辣椒减肥增效措施的研究已经有诸多报道。其中,氮肥减量是最主要的措施。如张帆等<sup>[5]</sup>研究表明,减施40%氮肥,辣椒果实产量显著提高19.93%,更有利于促进辣椒果实中可溶性糖、还原糖、可溶性蛋白、维生素C含量的提高。也有研究关注了有机肥替代的效果,如江波等<sup>[6]</sup>研究表明相较于全量化肥,有机肥替代处理的辣椒产量增加2.3%~13.1%。有机氮替代50%时最有利于提高辣椒产量、品质以及减少土壤矿质态氮积累。近年来,氮肥减量与有机替代的结合成为热门研究方向,如徐大兵等<sup>[7]</sup>研究表明在高山露地辣椒 $300\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量的基础上,有机肥氮替代30%化肥氮或者减少20%化肥氮

处理能够获得与 $300\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮量略高或者相当的辣椒产量;有机肥氮替代30%化肥氮和减氮处理(10%、20%、30%)均能够降低辣椒果实中硝酸盐和总酸含量,而有机肥氮替代30%化肥氮处理辣椒品质要高于减氮处理。

总的来看,前人关于辣椒减肥增效措施的研究,主要还是集中在氮肥减量与有机肥替代方面。遗憾的是,针对辣椒化学磷肥减量的研究较少,尤其对露地辣椒体系的研究还鲜有报道。因此,探究化学磷肥减量和有机肥替代模式对于提高露地蔬菜地质量,维持露地蔬菜产业绿色发展具有重要意义。本研究在浙江省台州市天台县石梁镇开展露地辣椒施肥试验,探究磷肥减量与不同比例有机肥替代对露地辣椒产量品质及土壤肥力的影响,以期浙江省乃至全国的露地辣椒减肥增效方案制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

田间试验于2022年6—9月在天台县石梁镇察岭脚龙皇堂村进行。试验田海拔748 m,土壤类型为山地黄泥砂田,土壤质地属砂壤土。该地区属亚热带季风气候区,冬季平均气温为 $6.5\ ^\circ\text{C}$ ,春季平均气温 $16.0\ ^\circ\text{C}$ ,夏季平均气温 $27.1\ ^\circ\text{C}$ ,秋季平均气温 $18.8\ ^\circ\text{C}$ 。多年平均降雨量 $1\ 587.3\ \text{mm}$ 。该区域自1983年<sup>[8]</sup>高山蔬菜开发成功以来,常年种植辣椒、茄子、黄瓜等露地蔬菜,前作为茄子。试验前土壤(0~20 cm)pH值5.90,有机质 $29.30\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮 $1.83\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷 $0.95\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全钾 $15.31\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮 $125.0\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效磷 $122.40\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾 $67.50\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,阳离子交换量 $7.95\ \text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,容重 $1.23\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

## 1.2 试验处理

试验共设5个处理,具体处理设置见表1。处理1为不施肥对照(CK),处理2为农户常规施肥(CF),处理3为化学磷肥减量施肥,常规施肥基础上减施30%化学磷肥(OF),处理4为化学磷肥减量施肥基础上,有机肥替代15%化肥氮(OF-15N),处理5为化学磷肥减量施肥基础上,有机肥替代30%化肥氮(OF-30N),在OF-15N和OF-30N处理中,P和K不足部分用磷钾肥补齐。试验用的有机肥为腐熟鸡粪肥(产自天台县亿顺牧业有限公司,含9.32%水分,3.85% N, 3.27% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 3.37% K<sub>2</sub>O, Ca 31.55 mg·g<sup>-1</sup>, Mg 20.72 mg·g<sup>-1</sup>, Fe 1 040.08 mg·kg<sup>-1</sup>, Mn 146.06 mg·kg<sup>-1</sup>, Cu 12.45 mg·kg<sup>-1</sup>, Zn 55.91 mg·kg<sup>-1</sup>),氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%),钾肥为硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 52%)。试验辣椒品种为萧新系列。鸡粪和过磷酸钙全部作基肥施用,尿素和硫酸钾作追肥,分别在移栽时和开花期时,按照30%和70%比例进行施用。小区面积20 m<sup>2</sup>,重复3次,随机区组排列。露地辣椒于2022年5月中旬进行育种和施基肥,6月5日进行辣椒移栽,6月5日至7月5日为辣椒幼苗期,7月5日至10月5日辣椒开花成熟期,进行分批次辣椒采摘并追肥。按照本区域常规方案进行辣椒移植和水分管理。

表1 试验处理设置(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 1 Experimental treatment settings(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			有机肥 Organic fertilizer	总养分 Total nutrient		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	0	0	0	0	0	0	0
CF	207.00	180.00	156.00	18 000	900.00	768.60	762.60
OF	207.00	126.00	156.00	18 000	900.00	714.60	762.60
OF-15N	175.95	99.64	128.84	18 806	900.00	714.60	762.60
OF-30N	144.90	73.29	101.68	19 612	900.00	714.60	762.60

## 1.3 样品采集与测试方法

土壤样品的采集与分析:土样于整地前和收获期,随机采用5点采样法采集耕作层(0~20 cm)土壤,将土样进行自然风干,参照《土壤农化分析》<sup>[9]</sup>中的方法测定土壤理化性质:土壤pH值用pH计测定(土水比为1:10);有机质用重铬酸钾容量法(外加热法)测定;土壤全氮用半微量凯氏定氮法测定;土壤全磷用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定;土壤全钾用氢氧化钠熔融-火焰光度计测定;碱解氮用碱解扩散法测定;有效磷用Olsen浸提-钼锑抗比色法测定;速效

钾用NH<sub>4</sub>Ac浸提-火焰光度计法测定。

植株样品的采集与分析:在露地辣椒盛果期调查辣椒经济性状(单果长和单果质量),分批采摘累计总产量(Yield)。辣椒可溶性糖(Soluble sugar, SS)用铜还原碘量滴定法测定,总酸(Total acid, TA)用酸碱滴定法测定,可溶性蛋白(Soluble protein, SP)用Brandford法测定,维生素C(Vitamin C, VC)用2,6-二氯酚酚滴定法测定<sup>[9]</sup>。辣椒经105℃杀青30 min后,60℃烘干至质量恒定,经H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮完全后,用0.45 μm滤膜过滤,最后用ICP-OES测定Ca、Mg、Cu、Zn、Fe、Mn含量。

## 1.4 土壤综合肥力评价

### 1.4.1 参评指标的选取

在选择评价指标时,土壤的物理性质相对稳定,生物肥力变化太快,一般不用来评价土壤综合肥力,通常选用土壤有机质、氮、磷、钾等养分指标来评价土壤综合肥力。基于大量田间试验研究结果,本研究选取收获期的土壤pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾8项指标,作为参评指标综合反映土壤肥力状况<sup>[10]</sup>。

### 1.4.2 土壤综合肥力的计算

土壤肥力评价方法:根据全国土壤第二次普查标准对土壤进行分级<sup>[11]</sup>(表2),参考郭成士等<sup>[12]</sup>计算方法,计算出土壤单一指标养分分肥力系数IFI<sub>i</sub>,再采用修正后的在土壤肥力评价中广泛应用的内梅罗指数法计算土壤的综合肥力<sup>[11]</sup>。

(1)土壤单一指标养分分肥力系数IFI<sub>i</sub>的计算<sup>[11-12]</sup>:

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{X}{X_a} & X \leq X_a \\ 1 + \frac{X - X_a}{X_c - X_a} & X_a < X \leq X_c \\ 2 + \frac{X - X_c}{X_p - X_c} & X_c < X \leq X_p \\ 3 & X > X_p \end{cases} \quad (1)$$

式中:IFI<sub>i</sub>表示土壤单一指标养分分肥力系数;X表示测定值;X<sub>a</sub>、X<sub>c</sub>和X<sub>p</sub>值参照表2。

(2)用修正的内梅罗(Nemoro)<sup>[11]</sup>公式计算土壤的综合肥力指数(IFI)。

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

式中:IFI为土壤综合肥力指数;IFI<sub>i最小</sub>为各分肥力系数最小值;IFI<sub>i平均</sub>为各分肥力系数均值;N代表评价指标的个数。IFI值介于0~3之间,IFI值越大,表示土壤

表2 土壤各理化指标的分级标准值<sup>[11]</sup>

Table 2 Grading standard values of soil physical and chemical indexes<sup>[11]</sup>

分级 Grade	pH(H <sub>2</sub> O)	SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )
X <sub>a</sub>	4.5	10	0.75	0.4	5	60	3	40
X <sub>c</sub>	5.5	20	1.5	0.6	20	120	10	100
X <sub>p</sub>	6.5	30	2.0	1	25	180	20	150

注:SOM为有机质;TN为全氮;TP为全磷;TK为全钾;AN为碱解氮;AP为有效磷;AK为速效钾。下同。

Note:SOM indicates soil organic matter; TN indicates total nitrogen; TP indicates total phosphorus; TK indicates total potassium; AN indicates alkali-hydrolyzed nitrogen; AP indicates available phosphorus; AK indicates available potassium. The same below.

的综合肥力越高。

### 1.5 数据处理与分析

利用 Excel 2019 进行数据统计与整理,采用单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 法进行多重比较( $P < 0.05$ )。采用主成分分析法(PCA),计算土壤各分肥力系数的权重和贡献率并提取主成分。采用冗余分析法(RDA)计算土壤肥力与产量品质各指标相互之间的相关性和贡献率。利用 Pearson 相关分析检验产量品质和土壤肥力指标之间的关系。主成分和相关性分析均在 SPSS 19.0 软件完成,冗余分析和绘图在 Canoco 5 软件上完成,柱状图、箱线图和热图在 OriginPro 2021 中完成。

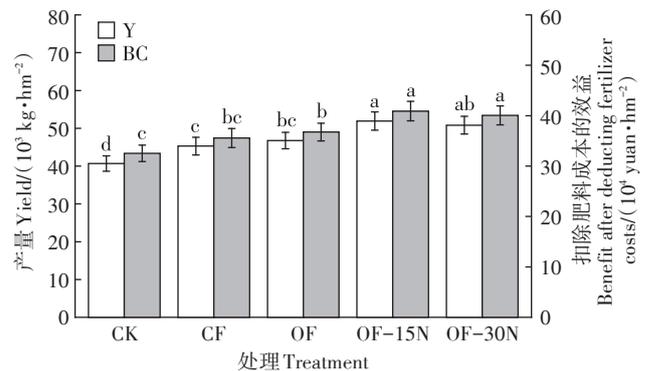
## 2 结果与分析

### 2.1 磷肥减量与有机肥替代对露地辣椒产量及经济性状的影响

试验结果表明,常规施肥基础上减施 30% 化学磷肥,露地辣椒产量并没有出现下降,反而增产 3.20%;在减施 30% 化学磷肥的基础上,有机肥替代化肥能显著提高露地辣椒的产量(图 1),OF-15N 和 OF-30N 处理产量较 CF 处理分别提高 14.59% 和 12.21% ( $P < 0.05$ )。相较于 CF 处理,OF-15N 和 OF-30N 处理扣除肥料成本的效益分别提高 15.21% 和 12.84%,增收效果显著( $P < 0.05$ )。从露地辣椒的经济性状分析,相较于 CF 处理,OF 处理、OF-15N 处理和 OF-30N 处理的单果长和单果质量略有增加,但是整体差异不显著(如图 2 所示)。综合增产增收效果来看,磷肥减量+有机肥替代模式>磷肥减量模式≈常规施肥模式。

### 2.2 磷肥减量与有机肥替代对露地辣椒品质的影响

在减施 30% 化学磷肥的基础上,有机肥替代化肥能显著改善辣椒品质(表 3)。OF-15N 处理和 OF-30N 处理较 CF 处理,可溶性糖含量分别显著提高 0.46 个和 0.26 个百分点( $P < 0.05$ );OF 处理较 CF 处理

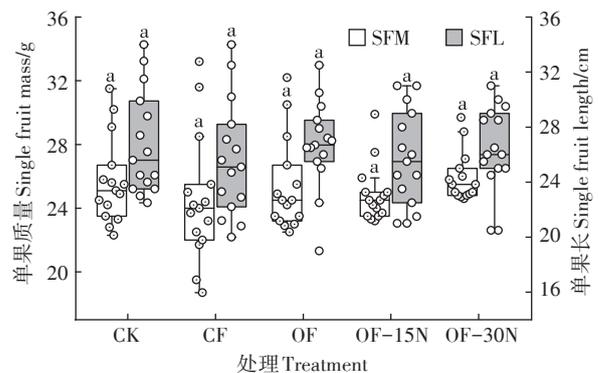


Y:产量;BC:扣除肥料成本的效益;肥料成本按 2022 年尿素 2 250 元·t<sup>-1</sup>、过磷酸钙 800 元·t<sup>-1</sup>、硫酸钾 2 500 元·t<sup>-1</sup>、鸡粪肥 200 元·t<sup>-1</sup> 计算,露地辣椒单价按 8 000 元·t<sup>-1</sup> 计算;不同字母表示相同指标不同处理间差异显著(LSD 检验, $P < 0.05$ )。下同。

Y:yield; BC:benefit after deducting fertilizer costs; The fertilizer cost is calculated as urea 2 250 yuan·t<sup>-1</sup>, calcium superphosphate 800 yuan·t<sup>-1</sup>, potassium sulfate 2 500 yuan·t<sup>-1</sup> and chicken manure 200 yuan·t<sup>-1</sup> in 2022. The output value of open-field pepper is calculated as 8 000 yuan·t<sup>-1</sup>; different letters indicate the same index with significant difference between different treatments (LSD test,  $P < 0.05$ ). The same below.

图1 各处理对产量及效益的影响

Figure 1 Effects of each treatment on yield and benefit



SFM:单果质量;SFL:单果长。

SFM: single fruit mass; SFL: single fruit length.

图2 各处理对露地辣椒单果长及单果质量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on single fruit length and single fruit mass of open-field pepper

可溶性糖含量提高 0.1 个百分点,但是差异不显著。相较于 CF 处理,OF-15N 处理和 OF-30N 处理总酸含

量差异较小,但是明显改善糖酸比,糖酸比从10.95分别提高到13.23和12.31。较CF处理,OF-15N处理和OF-30N处理可溶性蛋白含量提高0.09和0.04个百分点,但是差异不显著,而OF处理则显著提高0.41个百分点。相较于CF处理,OF处理、OF-15N处理和OF-30N处理维生素C含量均有提高,但效果不显著。就中微量元素含量来看,相较于CF处理,OF处理、OF-15N处理和OF-30N处理均能够提高露地辣椒的Ca、Mg、Zn、Fe含量,且OF-30N处理提升效果要优于OF-15N和OF处理(表4)。综上,磷肥减量+有机肥替代模式明显提高露地辣椒的糖酸比,改善辣椒营养

品质,同时促进对钙、镁、铁、锌等中微量元素吸收。

### 2.3 磷肥减量与有机肥替代对土壤肥力的影响

#### 2.3.1 磷肥减量与有机肥替代对土壤理化指标的影响

从表5可见,与CF处理相比,OF-15N与OF-30N处理的土壤pH值从5.85分别提高到5.95和6.01( $P<0.05$ ),土壤全氮分别提高0.04  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.08  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中OF-30N处理提升效果显著( $P<0.05$ ),土壤有机质提高0.56~1.64  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,但是效果不显著。与CF处理相比,OF处理、OF-15N处理和OF-30N处理土壤全磷分别显著下降0.08、0.12  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.10  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ( $P<$

表3 各处理对露地辣椒盛果期营养物质含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on nutrient contents of high-fruited period of open-field pepper

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble suger/%	总酸 Total acids/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	糖酸比 Sugar-acid ratio	可溶性蛋白 Soluble protein/%	维生素C Vitamin C/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
CK	2.28±0.08bc	1.88±0.05a	12.09±0.11c	2.81±0.13a	428.67±7.04a
CF	2.08±0.08d	1.90±0.05a	10.95±0.14e	2.31±0.06b	422.16±20.00a
OF	2.18±0.06cd	1.89±0.07a	11.54±0.11d	2.72±0.08a	432.04±16.00a
OF-15N	2.54±0.10a	1.92±0.05a	13.23±0.18a	2.40±0.05b	441.36±21.24a
OF-30N	2.34±0.07b	1.90±0.06a	12.31±0.02b	2.35±0.04b	434.42±13.02a

注:不同字母表示相同指标不同处理间差异显著(LSD检验, $P<0.05$ ),下同。

Note: Different letters indicate the same index with significant difference between different treatments (LSD test,  $P<0.05$ ). The same below.

表4 各处理对露地辣椒中微量元素含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 4 Effects of different treatments on the contents of micronutrients in open-field pepper( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

处理 Treatment	Ca	Mg	Zn	Cu	Mn	Fe
CK	1 682.8±34.1ab	1 486.0±64.4b	68.1±4.3b	7.0±0.2a	16.0±0.6a	99.3±4.8bc
CF	1 419.2±48.2c	1 273.0±62.4c	49.5±3.1c	6.9±0.2a	15.9±0.9a	93.3±6.7c
OF	1 428.5±23.7c	1 411.3±36.6b	55.6±3.4c	7.1±0.3a	16.2±0.9a	98.6±2.9bc
OF-15N	1 734.3±39.8a	1 448.2±42.4b	76.5±4.0a	7.1±0.2a	16.4±0.5a	104.9±3.0b
OF-30N	1 612.2±52.6b	1 643.2±52.2a	82.7±2.1a	7.2±0.3a	16.5±0.6a	113.6±5.1a

表5 各处理对露地辣椒土壤理化指标的影响

Table 5 Effects of different treatments on soil physicochemical indexes of open-field pepper

处理 Treatment	pH	SOM/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	TN/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	TP/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	TK/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
CK	5.94±0.04ab	29.08±0.89a	1.81±0.03c	0.90±0.03b	15.04±0.43a
CF	5.85±0.02c	29.23±0.81a	1.84±0.03bc	1.03±0.02a	15.20±0.53a
OF	5.91±0.05bc	29.79±1.22a	1.85±0.04bc	0.95±0.04b	15.10±0.76a
OF-15N	5.95±0.04ab	30.41±1.3a	1.88±0.04ab	0.91±0.04b	14.68±0.41a
OF-30N	6.01±0.05a	30.87±0.76a	1.92±0.03a	0.93±0.03b	14.55±0.32a
处理 Treatment	AN/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AP/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	AK/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	阳离子交换量CEC/( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	容重BD/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
CK	113.71±3.06b	90.24±6.61c	56.57±5.48b	7.90±0.13a	1.224±0.004a
CF	125.39±3.25a	140.43±13.6a	64.58±2.94a	7.92±0.27a	1.228±0.003a
OF	123.14±3.2a	109.08±6.92b	66.11±3.10a	7.98±0.25a	1.225±0.004a
OF-15N	124.09±3.27a	94.18±4.8bc	67.27±5.04a	8.03±0.28a	1.223±0.005a
OF-30N	124.62±3.36a	98.47±8.3bc	68.03±3.54a	8.08±0.31a	1.222±0.006a

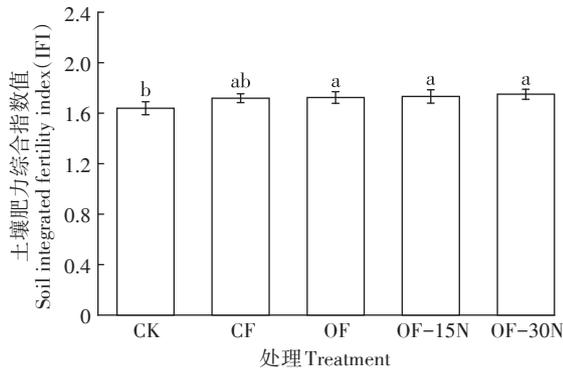


图3 各处理对土壤肥力综合指数值的影响

Figure 3 Effects of each treatment on soil integrated fertility index

0.05), 有效磷分别显著下降 22.32%、32.93% 和 29.88% ( $P < 0.05$ )。除 CK 处理外, 各处理土壤碱解氮和速效钾含量差异不大, 而土壤全钾、阳离子交换量和容重在所有处理之间均没有显著差异。总的来看, 与常规处理相比, 磷肥减量与有机肥替代处理在减磷 30% 的基础上能够保证土壤速效养分的供应, 还能缓解土壤酸化和提升土壤有机质和全氮, 具有较好的土壤培肥、地力提升潜力。

### 2.3.2 土壤肥力综合评价

采用修正的内梅罗指数法对土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾共 8 个肥力

指标进行土壤综合肥力计算, 结果如图 3 所示。各处理土壤肥力综合指数值 (IFI) 从大到小依次为: OF-30N 处理 (1.750) > OF-15N 处理 (1.733) > OF 处理 (1.724) > CF 处理 (1.718) > CK 处理 (1.639), 但各施肥处理之间差异不显著。与试验前土壤肥力综合指数值 (1.731) 相比, OF、CF 和 CK 处理土壤肥力均有所下降, 而 OF-15N 和 OF-30N 处理土壤肥力有所提升。土壤单项肥力与土壤肥力综合指数值 (IFI) 的相关性分析表明, 土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮和速效钾均与土壤肥力综合指数值 (IFI) 之间存在显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 相关关系 (图 4)。同时, 运用主成分分析法进一步探究 8 个土壤单项肥力指标对土壤肥力综合指数值 (IFI) 的贡献率 (表 6)。按照贡献率 > 85% 的提取原则, 提取到 3 个主成分, 累积贡献率达到 95.11%。土壤单项肥力指标权重从高到低分别为: 有机质 > 全氮 > 速效钾 > 碱解氮 > pH 值 > 全钾 > 全磷 > 有效磷。由此可知, 磷肥减量和有机肥部分替代化肥后, 土壤有机质和全氮含量的提升使得土壤肥力综合指数值 (IFI) 提高, 但是土壤速效钾的相对不足限制了土壤综合肥力的进一步提升。

作物产量在一定程度上可以反映出土壤综合肥力的高低, 一般采用产量与综合肥力指数的相关关系来验证评价结果的准确性。由图 4 可知, 土壤肥力综

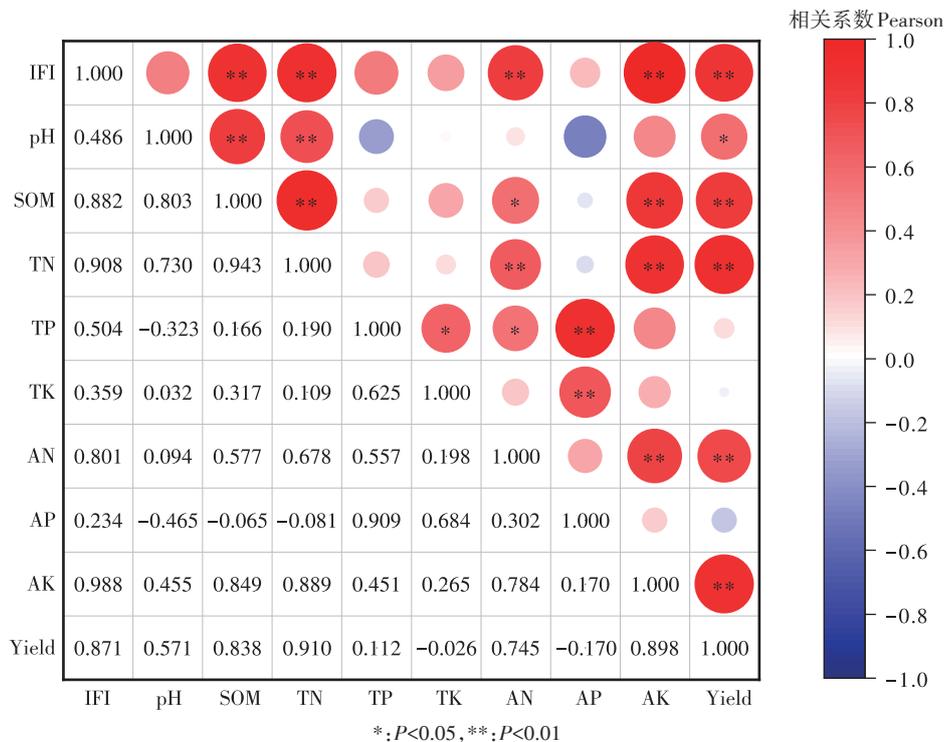


图4 土壤肥力与产量相关性热图

Figure 4 Heat map of correlation between soil fertility and yield

合指数值 (IFI) 与产量的相关系数达到 0.871, 二者呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 说明土壤综合肥力评价结果是可靠的。综上, 土壤有机质、全氮和速效钾显著影响露地蔬菜地土壤肥力, 而 OF-15N 和 OF-30N 处理均能够提高土壤综合肥力, 且 OF-30N 处理效果更佳。此外, 从长期培肥效果来看, 在 OF-30N 处理基础上, 还应该注重钾肥的补充。

#### 2.4 土壤肥力与露地辣椒产量和品质相关性分析

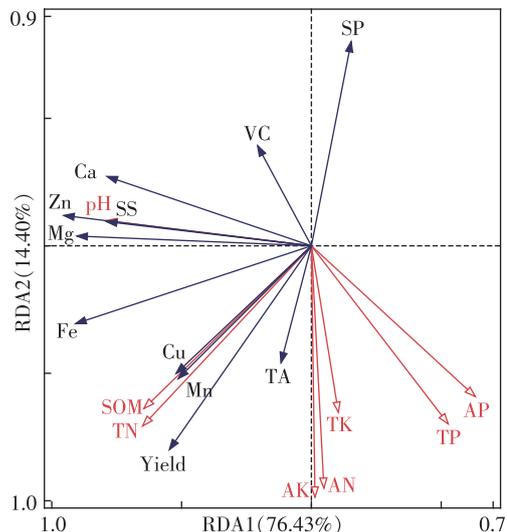
运用冗余分析探究土壤肥力指标对露地辣椒产量和品质的影响, 结果 (图 5) 表明, 土壤 pH 值、有机质、全氮和速效钾对露地辣椒产量和品质的影响较大, 其中土壤 pH 值、全氮和有机质与产量、可溶性糖、总酸和钙、镁、铁、锌含量之间呈强正相关关系。可见, 磷肥减量和有机肥部分替代化肥处理, 通过缓解土壤酸化, 提升土壤有机质和全氮含量, 从而提高了露地辣椒产量; 同时, 通过改善糖酸比, 促进钙、镁、铁、锌等中微量营养元素含量的吸收, 最终提高辣椒的营养品质。土壤速效钾与产量、总酸和钙、镁、铁、锌含量之间也呈正相关关系, 因此, 在氮、磷含量相对较高的土壤条件下, 土壤速效钾会成为作物产量品质的限制因子。此外, 值得注意的是, 土壤全磷和有效磷与辣椒产量、品质之间均呈现负相关关系。这说明磷肥的用量并不是越高越好, 过量的磷输入可能会导致作物产量、品质的下降。由此可见, 适当减施磷肥对于露地辣椒产量、品质的提高非常重要。

综上分析, 说明过低和过高的化肥投入均不利于作物产量和品质的提高, 合理的有机、无机肥料配施

表 6 土壤肥力指标主成分分析结果与指标权重

Table 6 Principal component analysis results and index weights of soil fertility factors

土壤单项肥力指标 Soil single fertility factor	主成分 Principal component			综合得分 Score	指标权重 Weight
	PC1	PC2	PC3		
pH	0.477	0.018	-0.233	0.231	0.121
SOM	0.430	0.295	0.122	0.346	0.182
TN	0.363	0.406	-0.024	0.333	0.175
TP	-0.095	0.304	0.863	0.159	0.083
TK	0.140	-0.044	0.981	0.173	0.091
AN	0.059	0.564	0.204	0.256	0.134
AP	-0.156	0.129	0.951	0.075	0.040
AK	0.260	0.480	0.204	0.331	0.174
特征值 Eigenvalue	4.014	2.704	0.891		
贡献率 Contribution rate/%	33.504	30.806	30.802		
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	33.504	64.310	95.112		



蓝色部分为辣椒产量品质指标, 红色部分为土壤肥力指标。  
SS: Soluble sugar, 可溶性糖; TA: Total acids, 总酸; SP: Soluble protein, 可溶性蛋白; VC: Vitamin C, 维生素 C。  
The blue part is the yield and quality index of pepper and the red part is the soil fertility index. SS: soluble sugar; TA: total acids; SP: soluble protein; VN: vitamin C.

图 5 土壤肥力指标与产量品质的冗余分析

Figure 5 Redundancy analysis of soil fertility index with yield and quality

模式是维持作物高产、高质的关键。综合产量、品质、土壤肥力和经济效益来看, 磷肥减量+有机肥替代模式均能够有效培肥土壤, 维持露地辣椒的高产和高品质, 且 OF-30N 处理优于 OF-15N 处理。

### 3 讨论

#### 3.1 磷肥减量与有机肥替代对辣椒产量和品质的影响

高氮高磷肥投入是目前露地蔬菜体系普遍存在的问题, 尤其是磷素。磷肥过量施用会导致养分供给失衡, 不利于蔬菜的生长, 甚至可能造成减产<sup>[13]</sup>。因此, 探究适宜的磷肥施用量对于露地蔬菜的生产尤为重要。本研究表明, 在常规施肥的基础上减施 30% 化学磷肥, 露地辣椒产量并没有出现显著下降, 与陈睿等<sup>[14]</sup>在茭白上的研究结果一致。推测可能是高氮磷投入条件下, 钾素表现相对不足, 成为作物增产的限制因子, 而减磷 30% 后, 缓解了土壤氮、磷、钾养分失衡问题, 反而促进了辣椒的生长与养分吸收<sup>[15]</sup>。诸多研究表明有机肥替代是作物增产的关键措施, 适宜的有机肥替代比例可以保证蔬菜生长过程中的养分供应, 同时提高蔬菜光合作用, 促进植株干物质累积, 从而增加产量<sup>[16-17]</sup>。本试验结果也表明, 减施 30% 磷肥的基础上进行有机肥替代后, 辣椒呈现不同程度的增产。这可能是减磷 30% 的基础上, 进行有机肥替

代能够改善土壤理化特性,协调土壤养分供应,同时有机肥带来了大量的有机养分和有益微生物,改善了土壤碳氮比,土壤微生物群落代谢和土壤酶活性显著提高,促进了辣椒的生长与发育<sup>[18]</sup>。

不合理的氮、磷肥投入,土壤 C/N 和 C/P 比例失衡,不利于糖分、蛋白质等营养物质的形成和积累,导致蔬菜营养品质下降<sup>[19]</sup>。大量研究表明,化肥减量和有机肥替代是改善蔬菜营养品质的有效措施,对菜心、白菜、茄子等蔬菜可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 的提升效果明显<sup>[20-22]</sup>,但在减磷的基础上进行有机肥替代对蔬菜品质的影响鲜有报道。本试验研究结果表明,磷肥减量与有机肥替代结合,辣椒可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 含量均有不同程度的提高。推测磷肥减量与有机肥替代结合条件下,土壤 C/N 和 C/P 比例更加协调,有利于辣椒生长;同时土壤可溶性有机物、微量元素等供应充足,有利于可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 等营养物质的合成,并向果实等储藏器官转运<sup>[23-24]</sup>。本研究中,磷肥减量与有机肥替代结合条件下,辣椒中钙、镁、铁、锌等微量元素含量也有所提高,进一步证实了上述推测<sup>[25-27]</sup>。

### 3.2 磷肥减量与有机肥替代对土壤肥力的影响

氮、磷肥的过量施用可能会导致土壤酸化、土壤板结等问题,导致土壤肥力下降,不利于蔬菜的生长<sup>[28]</sup>。本研究结果发现减施 30% 磷肥,辣椒产量变化不大,土壤供磷水平仍处于丰富水平,且土壤酸化有所缓解,该结果进一步证实了在磷素过量积累的土壤中,尤其是蔬菜地土壤减施磷肥的可行性<sup>[29]</sup>。根据试验结果推算,土壤有效磷每年约下降 20%,将在 3~4 a 后达到推荐水平<sup>[4]</sup>(46.0~58.0 mg·kg<sup>-1</sup>)。理论上,减施 30% 磷肥的基础上,仍然存在进一步减施磷肥的可能性,这也有待我们进一步的试验探究。

有机肥替代是近年发展起来的作物减肥增效的有效途径,在小麦、玉米、番茄等大量作物的研究上表明适宜比例的有机肥替代不仅可以保证土壤速效养分的供应,还能够缓解土壤酸化,增加土壤有机质和全氮含量,改善土壤容重、孔隙度等理化性质,提升土壤肥力<sup>[30-32]</sup>。本研究中,相较于化学磷肥减量处理,化学磷肥减量 30% 基础上进行有机肥替代,土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量没有显著变化,而土壤 pH 值、有机质和全氮含量均有不同程度的提高。通过土壤综合肥力评价分析发现,磷肥减量 30% 的土壤肥力没有显著下降,而磷肥减量 30% 基础上进行有机肥替代处理,土壤肥力有所提高,这一结果进一步证

实磷肥减量与有机肥替代结合在土壤培肥改良中的作用,其改良机制可能是:一方面,氮磷肥减施缓解土壤酸化,有利于土壤 C、N、P 等转化相关酶活性的提高,能有效协调养分的供应;另一方面,前人大量研究表明增施有机肥能提高土壤有机质含量,进而提高水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量,改善土壤结构,提高保水保肥能力<sup>[33-36]</sup>。

相关性分析结果表明,土壤肥力与产量之间呈极显著正相关关系;主成分分析结果表明,土壤有机质、全氮和速效钾是引起露地蔬菜地土壤肥力差异的三大关键因子。该结果印证了有机肥替代对作物增产的重要作用,正是因为有机肥替代土壤有机质和供氮能力的提高,使得土壤肥力稳中有升,露地辣椒显著增产<sup>[37-38]</sup>。另外,值得注意的是,土壤速效钾也成为露地蔬菜地土壤肥力差异的关键因子之一,说明长期偏施氮、磷肥,土壤速效钾含量过低,蔬菜收获带走的钾素一部分来自于钾肥,而另外不足部分钾素则来源于土壤钾素的释放,长此以往,会耗竭土壤钾素,极大降低土壤的供钾能力,使得土壤肥力下降;磷肥减量与有机肥替代结合协调了土壤氮、磷、钾养分供应,尤其是增施有机肥后提高了土壤的保水保肥能力,促进土壤钾素的矿化释放与积累,提高作物对养分的吸收,实现露地蔬菜的增产<sup>[39-40]</sup>。

## 4 结论

(1) 化学磷肥减量 30% 的基础上,有机肥替代 15% 和 30% 化肥氮处理均能够提高辣椒的产量和效益,同时改善可溶性糖、糖酸比等营养品质指标,促进钙、镁、铁、锌等微量元素的吸收。

(2) 土壤有机质、全氮和速效钾是影响露地辣椒地土壤肥力的关键因子。在化学磷肥减量 30% 的基础上,有机肥替代 15% 和 30% 化肥氮处理均能提升露地辣椒土壤综合肥力,且在化学磷肥减量 30% 基础上,有机肥替代 30% 化肥氮处理提升效果优于有机肥替代 15% 化肥氮处理。

(3) 综合产量、品质及土壤肥力提升效果来看,结合当前“减肥增效”的需求,推荐在将化学磷肥减量 30% 的基础上,通过有机肥替代 30% 化肥氮处理作为露地辣椒的施肥方案。

### 参考文献:

- [1] 邹学校,朱凡. 辣椒的起源、进化与栽培历史[J]. 园艺学报, 2022, 49(6): 1371-1381. ZHOU X X, ZHU F. Origin, evolution and cultiva-

- tion history of the pepper[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, 49(6): 1371–1381.
- [2] 乔立娟, 赵帮宏, 宗义湘, 等. 我国辣椒产业发展现状、趋势及对策[J]. *中国蔬菜*, 2023(11): 9–15. QIAO L J, ZHAO B H, ZONG Y X, et al. Development current situation, tendency, and countermeasure for China's pepper industry[J]. *China Vegetables*, 2023(11): 9–15.
- [3] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480–1493. HUANG S W, TANG J W, LI C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1480–1493.
- [4] YAN Z J, LIU P P, LI Y H, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: overfertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 982–989.
- [5] 张帆, 崔浩, 秦志翔, 等. 减氮和氮硅配施对辣椒产量、营养品质及养分吸收利用的影响[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(9): 1518–1527. ZHANG F, CUI Y H, QIN Z X, et al. Effect of nitrogen reduction and nitrogen-silica application on yield, nutritional quality and nutrient uptake and utilization of pepper[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(9): 1518–1527.
- [6] 江波, 薛贞明, 王静, 等. 有机氮不同替代量对辣椒产量、品质及土壤矿质态氮的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(5): 162–164, 168. JIANG B, XUE Z M, WANG J, et al. Effects of substitution proportion of organic nitrogen on pepper yield, quality and soil mineral nitrogen[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(5): 162–164, 168.
- [7] 徐大兵, 周剑雄, 邱正明, 等. 氮肥替代和减施对高山露地辣椒养分吸收和产量与营养品质的影响[J]. *北方园艺*, 2019(21): 1–6. XU D B, ZHOU J X, QIU Z M, et al. Effects of nitrogen replacement and reduction on nutrient accumulation, yield and quality of pepper on high mountain open field[J]. *Northern Horticulture*, 2019(21): 1–6.
- [8] 陈素云. 打品牌、创名牌, 提升高山蔬菜产业: 天台县高山蔬菜产业发展概况、主要作法和发展思路[J]. *长江蔬菜*, 2008(4): 1–3. CHEN S Y. Brand, create brand name, enhance the mountain vegetable industry: general situation, main methods and development ideas of mountain vegetable industry in Tiantai County[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2008(4): 1–3.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 57–83. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 57–83.
- [10] 张先婉. 土壤肥力研究进展[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 208–213. ZHANG X W. A review on soil fertility[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1991: 208–213.
- [11] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. *土壤通报*, 1994(6): 245–247. KAN W J, WU Q T. Preliminary study on a quantitative evaluation method of soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994(6): 245–247.
- [12] 郭成士, 谢坤, 丁大伟, 等. 豫东潮土区近14年土壤肥力和作物产量的演变及其对施肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(7): 1290–1299. GUO C S, XIE K, DING D W, et al. Soil fertility and crop yield variation and their response to fertilization in the fluvo-aquic soil regions of east Henan Province from 2006 to 2019[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7): 1290–1299.
- [13] 王冬群, 成美玲, 王立, 等. 氮磷钾肥用量对菜用大豆产量及养分吸收的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(5): 129–132. WANG D Q, CHENG M L, WANG L, et al. Impacts of N, P, K application on yield and nutrient absorption of vegetable soybean[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(5): 129–132.
- [14] 陈睿, 丁安娜, 林聪, 等. 减磷或减氮施肥对茭白浙茭2号产量及品质的影响[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(1): 9–10. CHEN J, DING A N, LIN C, et al. Effect of phosphorus reduction or nitrogen reduction fertilization on yield and quality of *Zizania aquatica* Zhejiao No.2[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(1): 9–10.
- [15] FEYISSA T, ZHAO S X, MA H L, et al. Optimizing plant density and balancing NPK inputs in combination with innovative fertilizer product for sustainable maize production in North China Plain[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 10279.
- [16] 冀建华, 刘光荣, 李祖章, 等. 基于AMMI模型评价长期定位施肥对双季稻总产量稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4): 685–696. JI J H, LIU G R, LI Z Z, et al. Effects of long-term fertilization on stability of double cropping rice yield based on AMMI model[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(4): 685–696.
- [17] 李岚坤, 吴杰, 常会庆, 等. 有机肥替代无机氮对菠菜生长及氮利用效率的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(8): 139–144. LI L K, WU J, CHANG H Q, et al. Effects of organic fertilizer replacing inorganic nitrogen on growth and nitrogen use efficiency of spinach[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(8): 139–144.
- [18] DAI X L, SONG D L, ZHOU W, et al. Partial substitution of chemical nitrogen with organic nitrogen improves rice yield, soil biochemical indicators and microbial composition in a double rice cropping system in south China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 205: 104753.
- [19] 杨东, 陈益, 唐静, 等. 强酸性土壤磷肥用量对莴笋产量、品质及磷素利用效率的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(1): 158–164. YANG D, CHEN Y, TANG J, et al. Effect of phosphate fertilizer on yield, quality and efficiency of phosphorus of lettuce in strong acidic soil[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2017, 39(1): 158–164.
- [20] 胡琦琪, 余炜敏, 梁嘉伟, 等. 化肥减量配施增效剂对土壤理化性质及菜心产量、品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2023, 50(6): 53–61. HU Q Q, YU W M, LIANG J W, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with synergist on soil physicochemical properties, yield and quality of Chinese flowering cabbage[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2023, 50(6): 53–61.
- [21] 郭刚, 严从生, 袁嫚嫚, 等. 化肥减量配施有机肥对叶菜类蔬菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(12): 58–62. WU G, YAN C S, YUAN M M, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic manure application on yield, quality and nutrient uptake of leafy vegetables[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(12): 58–62.
- [22] 肖让, 张永玲, 赵芸晨, 等. 化肥减量配施有机肥对日光温室土壤质量及茄子产量、品质的影响[J]. *华北农学报*, 2023, 38(2): 188–

198. XIAO R, ZHANG Y L, ZHAO Y C, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer application on soil quality, eggplant yield and quality in solar greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(2): 188-198.
- [23] 魏文良, 张赢心, 崔浩, 等. 有机无机配施对鲜食葡萄产量与品质及园区土壤质量的影响[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(3): 117-123. WEI W L, ZHANG Y X, CUI H, et al. Effects of organic fertilizer combined with chemical fertilizer on yield and quality of table grapes and soil quality in vineyards[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(3): 117-123.
- [24] 江波, 薛贞明, 王静, 等. 有机氮不同替代量对辣椒产量品质及土壤矿质态氮的影响[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(5): 162-164, 168. JIANG B, XUE Z M, WANG J, et al. Effects of substitution proportion of organic nitrogen on pepper yield, quality and soil mineral nitrogen[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2021, 49(5): 162-164, 168.
- [25] CARNEVALI N H, MARLENE E M, MARIA D C, et al. Nutritional efficiency of *Stryphnodendron polyphyllum* seedlings in function of nitrogen and phosphorus[J]. *Ciência Florestal*, 2016, 26(2): 449-461.
- [26] 陈爽, 李先平, 章志航, 等. 不同商品有机肥大量及中微量养分释放规律研究[J]. *土壤通报*, 2022, 53(4): 882-889. CHEN S, LI X P, ZHANG Z H, et al. Comparison of the releasing patterns of nutrients from different commercial organic fertilizers[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 882-889.
- [27] 茹淑华, 张国印, 李虎群, 等. 禽粪有机肥对土壤主要养分和微量元素锌累积的影响[J]. *华北农学报*, 2011, 26(增刊2): 157-162. RU S H, ZHANG G Y, LI H Q, et al. Effects of poultry manures on the main soil nutrients and zinc accumulation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(Suppl2): 157-162.
- [28] LIANG L Z, ZHAO X Q, YI X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2): 161-168.
- [29] 程启鹏, 熊启中, 徐雅婷, 等. 滴灌水肥一体化条件下磷肥减量对黄瓜磷素利用效率和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(1): 65-72. CHENG Q P, XIONG Q Z, XU Y T, et al. Effects of phosphate fertilizer reduction on phosphorus utilization efficiency and yield of cucumber under fertigation of drip irrigation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(1): 65-72.
- [30] 郭龙, 骆美, 常珺枫, 等. 有机养分替代对小麦产量、土壤肥力及麦田氮磷径流流失的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(10): 2063-2071. GUO L, LUO M, CHANG J F, et al. Effects of organic nutrient replacement on wheat yield, soil fertility and runoff loss of nitrogen and phosphorus in wheat field[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(10): 2063-2071.
- [31] 何浩, 张宇彤, 危常州, 等. 不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 281-287. HE H, ZHANG Y T, WEI C Z, et al. Effects of different organic substitution reducing fertilizer patterns on maize growth and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 281-287.
- [32] 郑福丽, 李国生, 张柏松, 等. 新建大棚番茄有机肥替代化肥的适宜比例及效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2): 360-368. ZHENG F L, LI G S, ZHANG B S, et al. Proportional replacement of organic N in chemical fertilizer for tomato production in a greenhouse system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 360-368.
- [33] 任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J]. *土壤*, 2023, 55(4): 756-763. REN L J, LI J, ZOU H T, et al. Effect of bio-organic fertilizer combined with chemical fertilizer on nutrient contents and soil aggregate distribution in greenhouse soil[J]. *Soils*, 2023, 55(4): 756-763.
- [34] 张平良, 郭天文, 刘晓伟, 等. 长期施肥与覆膜对半干旱区马铃薯农田土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(7): 104-111. ZHANG P L, GUO T W, LIU X W, et al. Effects of long-term fertilization and plastic-mulching on the distribution and organic carbon content of soil aggregates in potato field of semi arid area[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(7): 104-111.
- [35] 张晓伟, 刘加红, 戴绍明, 等. 商品有机肥对黏性红壤团聚体分布、烤烟产质量及养分利用率的影响[J]. *西南农业学报: 西南农业学报*, 2023, 36(8): 1718-1724. ZHANG X W, LIU J H, DAI S M, et al. Effects of commercial organic fertilizers on red soil aggregates distribution, yield, quality and nutrient utilization efficiency of flue-cured tobacco[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(8): 1718-1724.
- [36] SONG W F, SHU A P, LIU J A, et al. Effects of long-term fertilization with different substitution ratios of organic fertilizer on paddy soil[J]. *Pedosphere*, 2022, 32(4): 637-648.
- [37] FAN M S, LAL R, CAO J, et al. Plant-based assessment of inherent soil productivity and contributions to China's cereal crop yield increase since 1980[J]. *PLoS ONE*, 2017, 8(9): e74617.
- [38] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783-795. JU X T, GU B J. Status quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 783-795.
- [39] 毛伟, 李文西, 苏胜, 等. 长期不同肥料运筹对丘陵地区低产耕地土壤肥力与稻麦产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(1): 90-96. MAO W, LI W X, SU S, et al. Effect of long-term different fertilizer application on the soil fertility and crop yields in low-yield cultivated land of hilly region[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(1): 90-96.
- [40] CHEN X, CHEN X D, JIAO J B, et al. Towards balanced fertilizer management in South China: enhancing wax gourd (*Benincasa hispida*) yield and produce quality[J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5646-5646.

(责任编辑:叶飞)