

贵州典型黄壤辣椒生长、品质及光合特性对新型肥料的响应

张 萌^{1,2}, 赵 欢^{1,2}, 肖厚军^{1,2}, 秦 松^{1,2}, 苟久兰^{1,2}, 王正银³

(1. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 2. 贵州省农业科学院肥料示范厂, 贵州 贵阳 550006;
3. 西南大学资源环境学院, 重庆 北碚 400716)

摘 要: 为探究新型肥料在贵州黄壤区辣椒上的施用效果, 本研究通过盆栽试验研究了普通复合肥(FHF)、保水型(BSX)、稳定性(WDX)、包膜型(BMX)缓释肥和长效氮肥(CXDF)五种新型肥料施用对贵州辣椒生长、品质及光合特性的影响, 并通过相关分析明确影响辣椒产量的主导因素, 以期为宜的新型肥料品种筛选及其在辣椒种植中的推广应用提供依据。结果表明: 与普通复合肥(FHF)相比, 施用新型肥料使辣椒株高增加 0.72% ~ 3.76%, 但对辣椒茎粗影响不大。新型肥料显著提高辣椒分蘖数和产量, 分蘖数和单株产量较 FHF 处理分别增加 2.65% ~ 19.75% 和 12.26% ~ 29.77%, 稳定性缓释肥(WDX)产量最高, 达到 300.35 g·株⁻¹。不同类型新型肥料对辣椒品质影响存在差异, 与普通复合肥(FHF)相比, 保水型缓释肥(BMX)可使辣椒硝酸盐含量显著降低 23.93%、还原糖增加 10.65%、Vc 增加 38.61%, 长效氮肥(CXDF)处理的硝酸盐含量显著降低 12.64%, 稳定性缓释肥(WDX)处理的 Vc 含量显著增加 56.21%, 而包膜型缓释肥(BMX)和长效氮肥(CXDF)处理的 Vc 含量则明显降低。相关分析结果表明, 辣椒株高、分蘖数以及净光合速率(P_n)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)均与辣椒产量存在显著或极显著的线性相关, 而综合考虑多个影响因子并利用逐步回归分析进行拟合后得到逐步回归分方程为 $Y = 52.316X_7 - 1.714X_6 + 640.888$ (X_6 为胞间 CO₂ 浓度(C_i)、 X_7 为蒸腾速率(Tr), 相关系数 r 为 0.924^{**}), 说明收获期辣椒叶片的胞间 CO₂ 浓度(C_i)与蒸腾速率(Tr)对辣椒产量的影响起到了主导作用。综上所述, 新型肥料对贵州典型黄壤上辣椒生长、品质以及光合特性的影响效果是显著的, 综合来看以稳定性(WDX)和包膜型(BMX)缓释型的施用效果最优。

关键词: 新型肥料; 辣椒; 产量; 品质; 光合特性; 黄壤区
中图分类号: S143.5; S641.3 **文献标志码:** A

Responses of growth, quality and photosynthetic characteristics of pepper to new-type fertilizers in Guizhou typical yellow soil

ZHANG Meng^{1,2}, ZHAO Huan^{1,2}, XIAO Hou-jun^{1,2}, QIN Song^{1,2}, GOU Jiu-lan^{1,2}, WANG Zheng-yin³

(1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guizhou Guiyang 550006, China;
2. Fertilizer demonstration plant of Guizhou Provincial Academy of Agricultural Sciences, Guizhou Guiyang 550006, China;
3. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing Beibei 400716, China)

Abstract: In order to explore the effects of new-type fertilizers on pepper in Guizhou yellow soil, a pot experiment with treatments of new-type fertilizers (including FHF, BSX, WDX, BMX and CXDF) was conducted, and the growth, quality and photosynthetic characteristics of Guizhou pepper were measured. The results showed that the application of new-type fertilizers increased the height by 0.72% ~ 3.76% compared with the FHF treatment, but there were no effect on the stems of the pepper. The new-type fertilizers significantly increased the tiller number and yield, the number of

收稿日期:2016-07-10 修回日期:2017-10-10
基金项目:贵州省科学技术基金项目(黔科合 LH 字[2014]7706 号);贵州省科技成果转化引导基金计划项目(黔科合成转字[2014]5028 号);贵州省农业科学院院专项([2015]11 号, [2016]025 号)
作者简介:张 萌(1989—),男,山东潍坊人,助理研究员,主要从事植物营养与新型肥料方面研究。E-mail: zhangmeng1105@163.com。
通信作者:赵 欢(1983—),男,助理研究员,主要从事植物营养、新型肥料与农业资源利用等方面研究。E-mail: zhaohuancnm@163.com。

tiller and the yield per plant were increased by 12.26% ~ 29.77% and 2.65% ~ 19.75% compared with FHF, respectively, and the highest yield was WDX treatment of 300.35 g·plant⁻¹. There were differences in pepper quality between the different types of new-type fertilizers, with BSX reducing the content of nitrate by 23.93%, increasing the contents of reducing sugar by 10.65% and the contents of Vc by 38.61% compared with FHF treatment. CXDF treatment significantly reduced the content of nitrate by 12.64%, while WDX treatment significantly increased the content of Vc by 56.21%, but the content of Vc among BMX and CXDF treatment were significantly decreased. Correlation analysis showed that the plant height, tiller number, net photosynthetic rate (P_n), CO₂ concentration (C_i) and transpiration rate (T_r) were significantly correlated with pepper yield. The stepwise regression equation was $Y = 52.316X_7 - 1.714X_6 + 640.888$, where X_6 was CO₂ concentration (C_i), X_7 was transpiration rate (T_r), the correlation coefficient was 0.924. This showed that the CO₂ concentration (C_i) and transpiration rate (T_r) of leaves played a leading role on pepper yield formation. In summary, new-type fertilizers demonstrated strong effect of on the growth, quality and photosynthetic characteristics of pepper in yellow soil, with the stable slow-release fertilizer(WDX) and coated slow-release fertilizer (BMX) showing the greater influence.

Keywords: new-type fertilizers; pepper; yield; quality; photosynthetic characteristics; yellow soil region

黄壤是中国南方山区的主要土壤类型之一,主要分布于贵州、四川两省以及云南和广西等地。贵州黄壤面积约为 703 万 hm²,占全国黄壤总面积的 30.27%,主要分布在海拔 800 ~ 1 600 m 地区,其中旱耕地黄壤 464.8 万 hm²,占全省旱耕地面积的 46.2%,是贵州省粮食、经济作物的主要生产基地,在农业生产中发挥着重要的作用^[1-2]。然而,由于粘、酸、瘦、瘠的土壤特点,这使得黄壤土生产力低下,严重制约着贵州省农业的发展^[3-4]。

辣椒作为贵州传统种植作物,截止 2010 年,贵州省辣椒种植面积已达 22.7 万 hm²,占全国的 15% 左右,鲜椒产量达 237.1 万 t,已经成为贵州经济作物发展的主导产业之一^[5-6]。然而,当前在贵州黄壤地区化肥过量投入现象普遍存在,造成辣椒产量水平和品质下降以及肥料利用率降低等,不仅无法实现作物高产、高效的施肥目标,而且还会导致严重的环境污染问题^[7]。新型肥料作为当前肥料产业发展的新方向,在增加作物产量、提高作物品质、提高肥料利用率以及减少劳动力等方面发挥了重要作用,是保证农业生产轻简高效的有效途径之一^[8-9]。不仅如此,新型肥料以其环境友好、养分释放与作物吸收同步、一次性施肥满足作物整个生长期需要、肥料利用率高等优点^[10-12],广泛应用于玉米、小麦以及蔬菜作物生产中,并且取得了良好效果^[13-20]。然而,当前关于新型肥料在贵州黄壤地区辣椒生产的研究却鲜见报道。因此,本文以“博辣 5 号”辣椒品种为试验材料,采用盆栽试验来比较普通复合肥与不同类型新型肥料在贵州黄壤区的施用效果,通过研究对贵州黄壤地区辣椒生长、品质及光合特性的影响,并通过关系拟合明确影响辣椒产量的主导

影响因子,以期筛选出适合贵州黄壤辣椒种植区最佳新型肥料品种,为新型肥料在贵州黄壤地区辣椒种植中的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 5 月—2015 年 10 月在贵州省土壤肥料研究所温室大棚内进行,供试土壤为贵州黄泥土,基本理化性质为:pH 值 6.08,有机质 39.69 g·kg⁻¹,碱解氮 95.95 mg·kg⁻¹,有效磷 32.70 mg·kg⁻¹,速效钾 119.00 mg·kg⁻¹。供试肥料包括 5 种,分别为:复合肥(西洋复合肥,N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)、保水型缓释肥(肥料中添加保水剂,由贵州省土壤肥料研究所自主研发生产,N:P₂O₅:K₂O 为 16:10:16)、稳定性缓释肥(肥料中添加脲酶抑制剂,由贵州骅龙肥料有限公司生产,N:P₂O₅:K₂O 为 16:10:16)、包膜型缓释肥(采用树脂包膜技术,由金正大肥料有限公司生产,N:P₂O₅:K₂O 为 18:8:16)和长效氮肥(树脂包衣尿素,含氮量为 46%)。供试辣椒品种为‘博辣 5 号’。

1.2 试验设计

试验共设置 6 个处理,分别为:(1) CK(对照,不施氮肥);(2) FHF(西洋复合肥);(3) BSX(保水型缓释肥);(4) WDX(稳定性缓释肥);(5) BMX(包膜型缓释肥);(6) CXDF(长效氮肥)。试验用土为过 2 mm 筛的风干土,试验容器选用长 57 cm、宽 38 cm、高 24 cm 的塑料盆,每盆装土 30 kg。各施肥处理的施肥量除 CK 处理不施氮肥外,各处理的氮、磷、钾肥用量相同,肥料用量为每千克土施 N 0.15 g、P₂O₅ 0.15 g 和 K₂O 0.15 g,肥料不足的用单质肥料过磷

酸钙(含 P_2O_5 12%)和硫酸钾(含 K_2O 45%)补充,即每盆 N 、 P_2O_5 和 K_2O 用量均为 4.5 g。每个处理设置 6 盆重复,每盆移栽 4 棵辣椒幼苗,每个处理共计 24 棵。辣椒种植前将肥料与土充分混匀后装盆,肥料均作为基肥一次性施入,具体施肥量见表 1。辣椒生长期定期更换盆钵位置,确保每盆得到均匀的光照,期间定期进行灌水和除草等常规管理措施。

1.3 测定内容和方法

1.3.1 土壤基本理化性质 土壤 pH 按照水土比 5:1—pH 计法测定;有机质用重铬酸钾容量法;碱解氮用碱解扩散法—标准酸滴定;有效磷采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提—火焰光度法测定^[21]。

1.3.2 辣椒生物性状、产量及品质的测定 分别在辣椒 4 个不同生育时期(苗期Ⅰ、营养生长期Ⅱ、坐果期Ⅲ、收获期Ⅳ)每个处理选择 5 株辣椒,用直尺和游标卡尺分别测量辣椒植株的株高和茎粗。在收获期随机选择 5 株辣椒统计其分蘖数,辣椒产量经过分批采收后于收获期计算辣椒的最终产量,同时将收获期的辣椒鲜样测定品质指标,包括硝酸盐、还原糖、Vc 和粗蛋白^[21]。

1.3.3 气体交换参数的测定 在辣椒采摘之前的晴天选取长势均匀的辣椒 3 株,于上午 9:00—11:30,用 Li-6400XT 便携式光合测定仪(Li-COR, USA)测定辣椒功能性叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(Tr)。测定时设置光强 $1\,200\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶室温度 25°C , CO_2 浓度为 $400\,\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,气体流速 $300\text{ mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

试验数据均采用 Excel 2003 软件进行计算处

理,利用 SPSS 和 DPS 软件进行统计分析,采用 Excel 2003 软件作图。

2 结果与分析

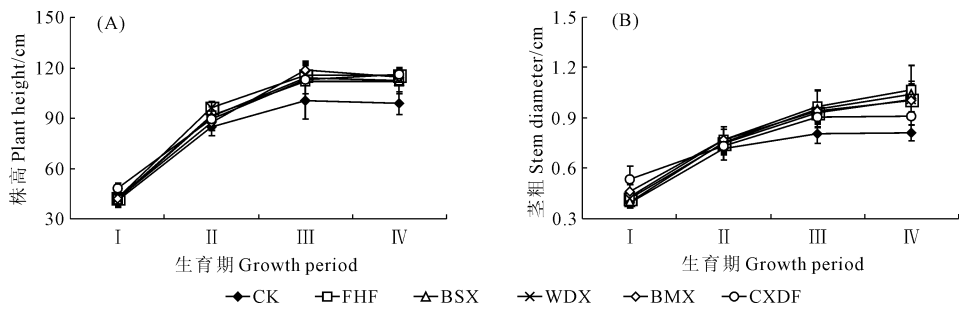
2.1 新型肥料对辣椒生物性状的影响

施用缓释肥可以显著改善辣椒的生物性状(图 1)。从辣椒株高来看(图 1A),不同施肥处理的辣椒株高随生育期推进在坐果期Ⅲ达到最大,之后保持平稳。进一步分析发现,苗期Ⅰ时,不同施肥处理的辣椒株高较 CK 处理相比增加 2.46%~19.02%,其中 CXDF 处理的辣椒株高显著高于其它施肥处理,而其它处理间无明显差异;营养生长期Ⅱ时,不同施肥处理辣椒株高较 CK 处理相比增加 3.55%~13.95%,以 WDX 处理的辣椒株高最大且显著高于 CK 和 BMX 处理;坐果期Ⅲ和收获期Ⅳ时,不同施肥处理的辣椒株高较 CK 处理分别增加 11.78%~18.56%和 13.16%~17.41%,均显著高于 CK 处理,但不同施肥处理间辣椒株高无差异。

从辣椒茎粗变化情况看(图 1B),其变化趋势与株高变化趋势类似,但不同的是辣椒茎粗是随着生育期的推进在收获期Ⅳ达到最大。从不同时期的辣椒茎粗分析,苗期Ⅰ不同施肥处理的辣椒茎粗较 CK 处理相比增加 2.77%~37.54%,其中以 CXDF 处理的茎粗最大且显著高于其它处理,BMX 处理次之,仅显著高于 CK 处理,而与其它施肥处理间差异未达显著水平;营养生长期Ⅱ和坐果期Ⅲ,各施肥处理的辣椒茎粗较 CK 处理分别增加 1.67%~7.00%和 11.65%~19.41%,但各施肥处理间均无明显差异;收获期Ⅳ不同施肥处理的辣椒茎粗较 CK 处理增加 12.44%~31.56%,以 FHF 处理的茎粗最大,其次为 BSX 处理,二者均显著高于 CXDF 处理。

表 1 不同施肥处理的肥料品种与施肥量
Table 1 Fertilizer type and the application rate treatments

处理 Treatment	N:P ₂ O ₅ :K ₂ O	肥料用量/(g·pot ⁻¹) Fertilizer application amount	过磷酸钙/(g·pot ⁻¹) Calcium superphosphate	硫酸钾/(g·pot ⁻¹) Potassium sulfate
CK(不施肥 No fertilizer)	—	—	37.50	10.00
FHF(西洋复合肥 Xiyang compound fertilizer)	15:15:15	30.00	—	—
BSX(保水型缓释肥 Water conservation slow release fertilizer)	16:10:16	28.13	14.06	—
WDX(稳定性缓释肥 Stability slow-release fertilizer)	16:10:16	28.13	14.06	—
BMX(包膜型缓释肥 Coated slow release fertilizer)	18:8:16	25.00	20.83	1.11
CXDF(长效氮肥 Long-acting nitrogen fertilizer)	46:0:0	9.78	37.50	10.00



注：Ⅰ，苗期；Ⅱ，营养生长期；Ⅲ，坐果期；Ⅳ，收获期
Note: Ⅰ, Seedling stage; Ⅱ, Vegetative growth phase; Ⅲ, Fruit-set stage; Ⅳ, Harvest stage

图 1 不同施肥处理的辣椒生物性状变化

Fig. 1 Changes of biological characteristics of pepper in different fertilization treatments

2.2 新型肥料对辣椒分蘖数及产量的影响

分蘖是辣椒产量形成的重要影响因素,分蘖数的多少直接关系到辣椒产量的高低。从表 2 可以看出,施肥能够显著影响辣椒的分蘖数和产量水平。从分蘖数来看,不同施肥处理的分蘖数较 CK 处理增加 63.60% ~ 106.75%,不同类型缓释肥中 BSX、WDX 和 BMX 处理的分蘖数较 FHF 增加 2.65% ~ 19.75%,而 CXDF 处理分蘖数低于 FHF 处理。

施用缓释肥对辣椒产量也有明显影响(表 2),不同施肥处理的单株辣椒产量在 101.09 ~ 300.35 g·株⁻¹之间,与 CK 处理相比,不同施肥处理的辣椒单株产量增幅为 102.26% ~ 197.11%,而与 FHF 处理相比,除 CXDF 处理产量有所降低外,BSX、WDX 和 BMX 处理增产幅度为 12.26% ~ 29.77%,说明施用缓释肥能显著提高辣椒产量,且较习惯施肥 FHF 处理相比增产效果明显。进一步分析发现,各施肥处理的辣椒单株产量以 WDX 处理最高为 300.35 g·株⁻¹,显著高于 FHF、BSX、WDX 和 CXDF 处理;BMX 和 BSX 处理的辣椒产量处于中等水平,分别为 283.28 g·株⁻¹和 259.82 g·株⁻¹,二者与 WDX 处理之间差异不显著但均显著高于 CXDF 处理;FHF 和 CXDF 处理的辣椒产量较低,分别为 231.45 g·株⁻¹

和 204.47 g·株⁻¹,二者之间无差异但均显著高于 CK 处理。

此外,通过线性拟合发现辣椒分蘖数与产量之间存在极显著 ($P < 0.01$) 的正相关性,拟合方程为 $Y = 7.7811X + 37.708$ ($n = 18$),相关系数 r 值为 0.683,说明可以通过增加辣椒分蘖数来提高辣椒的产量水平。

2.3 新型肥料对辣椒品质的影响

由表 3 可知,施肥能够降低辣椒中硝酸盐含量,与 FHF 处理相比,BMX 和 CXDF 处理的硝酸盐含量显著降低了 23.93% 和 12.64%,而 BSX 处理则显著提高了 12.45%,尽管 WDX 处理的硝酸盐含量较 FHF 处理相比略有升高,但含量仍远低于国家安全标准 ($\leq 440 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),并未产生硝酸盐含量超标的风险。从辣椒还原糖和粗蛋白含量来看,与普通复合肥(FHF)相比,施用新型肥料可以使还原糖和粗蛋白含量分别提高 0.45% ~ 10.65% 和 20.12% ~ 23.97%,其中 BSX 处理的还原糖含量显著高于 FHF 处理。BSX 和 WDX 处理的 Vc 含量分别较 FHF 处理显著增加了 83.61% 和 56.21%,而 BMX 和 CXDF 处理则分别显著降低了 38.80% 和 16.87%,说明保水型和稳定性缓释肥更有利于辣椒 Vc 含量的提升。

表 2 不同施肥处理的辣椒分蘖数与产量水平

Table 2 Tiller number and yield level of pepper in different fertilization treatments

处理 Treatment	分蘖数 Tiller number			产量 Yield		
	No. /plant	较 CK ± %	较 FHF ± %	g·plant ⁻¹	较 CK ± %	较 FHF ± %
CK	14.67 ± 2.89 b	—	—	101.09 ± 39.05 e	—	—
FHF	25.33 ± 4.16 a	72.69	—	231.45 ± 35.10 cd	128.95	—
BSX	30.33 ± 6.66 a	106.75	19.75	259.82 ± 43.00 bc	157.02	12.26
WDX	26.00 ± 4.58 a	77.23	2.65	300.35 ± 37.91 a	197.11	29.77
BMX	28.00 ± 4.36 a	90.87	10.54	283.28 ± 35.60 ab	180.22	22.39
CXDF	24.00 ± 3.46 a	63.60	-5.25	204.47 ± 22.86 d	102.26	-11.66

2.4 新型肥料对辣椒光合特性的影响

光合作用是作物产量形成的重要因素,提高光合速率是取得作物高产的主要途径。从辣椒收获期的叶片气体交换参数看(表 4),不同施肥处理的净光合速率 P_n 均显著高于 CK 处理,增幅为 150.34% ~ 459.43%,以 FHF 和 BMX 处理最优;气孔导度 G_s 以 BSX 处理最大,且显著高于 FHF 和 CXDF 处理,

但与 WDX 和 BMX 处理差异未达到显著水平;胞间 CO_2 浓度 C_i 与净光合速率 P_n 变化相反,以 CK 处理的 C_i 最大,显著高于 FHF、WDX、BMX 和 CXDF 处理,而不同施肥处理间 C_i 差异不明显;在蒸腾速率 Tr 方面,BSX、WDX 和 BMX 处理的 Tr 均显著高于 CK 和 FHF 处理,分别较 CK 和 FHF 处理提高 96.15% ~ 120.37% 和 115.91% ~ 142.58%。

表 3 不同施肥处理的辣椒品质
Table 3 The quality of pepper in different fertilization treatments

处理 Treatment	硝酸盐 Nitrate		还原糖 Reducing sugar		粗蛋白 Crude protein		Vc	
	$/(mg \cdot kg^{-1})$	较 FHF $\pm \%$	$/(mg \cdot g^{-1})$	较 FHF $\pm \%$	$\%$	较 FHF $\pm \%$	$/(mg \cdot 100g^{-1})$	较 FHF $\pm \%$
CK	81.33 $\pm$ 4.07 b	—	5.93 $\pm$ 0.30 ab	—	9.31 $\pm$ 0.47 b	—	1.07 $\pm$ 0.05 c	—
FHF	78.47 $\pm$ 3.92 b	—	5.53 $\pm$ 0.28 b	—	9.19 $\pm$ 0.46 b	—	0.89 $\pm$ 0.04 d	—
BSX	88.24 $\pm$ 4.41 a	12.45	6.12 $\pm$ 0.31 a	10.65	11.04 $\pm$ 0.55 a	20.12	1.63 $\pm$ 0.08 a	83.61
WDX	81.22 $\pm$ 4.06 b	3.52	5.55 $\pm$ 0.28 b	0.45	11.28 $\pm$ 0.56 a	22.79	1.39 $\pm$ 0.07 b	56.21
BMX	59.69 $\pm$ 2.98 d	-23.93	6.03 $\pm$ 0.30 ab	8.95	11.14 $\pm$ 0.56 a	21.18	0.54 $\pm$ 0.03 f	-38.80
CXDF	68.72 $\pm$ 3.44 c	-12.64	5.88 $\pm$ 0.29 ab	6.24	11.39 $\pm$ 0.57 a	23.97	0.74 $\pm$ 0.04 e	-16.87

表 4 不同施肥处理的辣椒光合特性
Table 4 The photosynthetic characteristics of pepper in different fertilization treatments

处理 Treatment	净光合速率 P_n Net photosynthetic rate $/(μmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	气孔导度 G_s Stomatal conductance $/(mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	胞间 CO_2 浓度 C_i Intercellular CO_2 concentration $/(μmol \cdot mol^{-1})$	蒸腾速率 Tr Transpiration rate $/(mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$
CK	0.37 $\pm$ 0.15 d	0.033 $\pm$ 0.003 bc	350 $\pm$ 10 a	1.42 $\pm$ 0.06 b
FHF	2.05 $\pm$ 0.47 a	0.033 $\pm$ 0.010 bc	274 $\pm$ 44 c	1.29 $\pm$ 0.31 b
BSX	1.36 $\pm$ 0.20 bc	0.058 $\pm$ 0.022 a	324 $\pm$ 17 ab	3.13 $\pm$ 1.31 a
WDX	1.57 $\pm$ 0.06 b	0.041 $\pm$ 0.010 abc	294 $\pm$ 16 bc	2.79 $\pm$ 0.82 a
BMX	2.07 $\pm$ 0.25 a	0.052 $\pm$ 0.008 ab	296 $\pm$ 17 bc	3.05 $\pm$ 0.55 a
CXDF	0.93 $\pm$ 0.14 c	0.022 $\pm$ 0.002 c	295 $\pm$ 1 bc	1.26 $\pm$ 0.07 b

2.5 辣椒产量与生物性状及光合特性的关系

2.5.1 辣椒产量与生物性状及光合特性的简单线性相关 采用简单线性相关分析和逐步回归分析来评估辣椒收获期生物性状以及光合参数与产量的相关性,明确影响辣椒产量的主导因素(表 5)。从简单线性相关分析看,辣椒收获期的生物性状株高和分蘖数与辣椒产量存在显著的一元一次正相关,相关系数 r 分别为 0.635 和 0.683,而光合参数 P_n 、 C_i 和 Tr 与推荐产量间也存在显著的相关性,其中 P_n 与产量之间的相关性符合一元二次模型,相关系数 r 达到 0.876, C_i 与产量存在显著的负相关性,相关系数 r 为 -0.565, Tr 与产量存在显著正相关性,相关系数 r 为 0.577。

2.5.2 辣椒产量与生物性状及光合特性的逐步回归分析 通过将所有影响因子逐个引入回归方程并得到最终的逐步回归方程(表 5),结果显示,辣椒产量与 C_i 和蒸腾速率 Tr 之间存在极显著的相关性,相

关系数 r 达到 0.924,说明收获期辣椒叶片的胞间 CO_2 浓度与蒸腾速率是影响辣椒产量的主导因素。

3 讨 论

近年来,新型肥料成为肥料行业和科研工作者的研究热点。与普通肥料相比,新型肥料通过包膜技术、添加抑制剂等方式来控制氮素释放并降低氮素损失,从而促进作物生长和产量形成^[22-26]。辣椒作为一种生育期较长的作物,其生长时间可达 5 个月之久,因此需要氮磷钾等养分的长期持续供应^[14,27]。本研究结果表明,与普通复合肥(FHF)相比,施用新型肥料可以使辣椒株高增加 0.72% ~ 3.76%,其中长效氮肥(CXDF)处理在辣椒苗期可以显著提高辣椒植株的株高和茎粗,作用效果显著高于其它新型肥料处理,但是苗期之后,作用效果开始减弱,其株高和茎粗均不如其它新型肥料效果明显,这说明长效氮肥可能在辣椒生长前期由于氮素释放

表 5 辣椒产量与生物性状及光合特性的关系

Table 5 Relationship between biological characters, photosynthetic characteristics and yield of pepper

相关性分析 Correlation analysis	因子 Factor		方程 Equation	相关系数 r Correlation coefficient
简单线性相关 Simple linear correlation analysis	株高 Plant height	X_1	$Y = 7.0024 X_1 - 563.53$	0.635 *
	茎粗 Stem diameter	X_2	$Y = 281.6 X_2 - 563.53$	0.450
	分蘖数 Tiller number	X_3	$Y = 7.7811 X_3 + 37.708$	0.683 **
	Pn	X_4	$Y = -78.54 X_4^2 + 290.34 X_4 + 10.077$	0.876 **
	G_s	X_5	$Y = 1841.8 X_5 + 157.11$	0.422
	C_i	X_6	$Y = -1.3032 X_6 + 628.16$	-0.565 *
	Tr	X_7	$Y = 40.073 X_7 + 143.73$	0.577 *
逐步回归分析 Stepwise regression analysis	$Y = 52.316 X_7 - 1.714 X_6 + 640.888$			0.924 **

注: * 和 ** 分别表示相关性达显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。

Note: * and ** indicate significance at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

过快进而导致后期出现辣椒“脱氮”现象,从而使其生长受限^[15]。保水型(BSX)、稳定性(WDX)和包膜型(BMX)缓释肥利用不同控制技术延缓了肥料中氮素的释放,但是由于不同原理而导致其氮素释放效果不同^[28]。从本研究辣椒产量水平看,BSX、WDX和BMX处理的辣椒产量较FHF处理分别提高了12.26%、29.77%和22.39%,这表明保水型、稳定性和包膜型缓释肥的控释效果均明显优于普通复合肥,以稳定性缓释肥效果最佳,包膜型缓释肥次之。分析原因可能是一方面树脂包膜型缓释肥可以阻隔肥料与土壤脲酶的直接接触,而添加生化抑制剂的稳定性缓释肥则可以抑制土壤脲酶活性,降低土壤硝化作用,从而减少氨挥发和N₂O排放量,提高肥料利用率^[29-30];另一方面,花后干物质和养分积累也是产量形成的重要因素,研究指出保水型和包膜型缓释肥相对有利于保持辣椒花后干物质和氮素吸收及其同化能力,而稳定性缓释肥则主要依靠花前积累的养分向果实转移来提高辣椒产量^[16,31],因此不同的干物质和养分转移特性也可能是导致稳定性缓释肥处理辣椒产量显著提高的原因之一。此外,本研究还对辣椒品质进行了检测,其中保水型缓释肥显著降低硝酸盐含量23.93%(硝酸盐国家安全标准为低于440 mg·kg⁻¹),说明保水型缓释肥对降低辣椒硝酸盐含量有明显效果,这可能与保水剂对NO₃⁻-N的吸附^[32]以及氮素释放特性有关^[14,33-34]。与此同时,保水型缓释肥较普通复合肥还可显著增加还原糖含量10.65%、增加Vc含量38.61%,而稳定性缓释肥则可显著增加Vc含量56.21%。

许大全^[35]和陈根云等^[36]研究指出,作物生长发育以及产量形成离不开光合作用,而*Ci*与气孔限

制值*Ls*的变化方向则是判断影响光合速率主要依据:若*Ci*增加且*Ls*降低说明是气孔因素导致光合速率变化;反之,则为非气孔因素。本研究通过计算气孔限制值*Ls*发现,胞间CO₂浓度(*Ci*)与气孔限制值(*Ls*)变化方向相反,说明气孔因素是影响收获期辣椒叶片光合速率的主要原因。因此BMX处理的辣椒叶片净光合速率(*Pn*)在收获期显著高于其它处理可能是由于肥料氮素缓慢释放,进而提高了辣椒叶片的气孔环境,通过提高气孔因素进而提高光合能力^[32]。

此外,作物产量及产量差的形成受多种影响因素制约,范兰等^[37]将水肥管理问题作为影响作物产量差形成的第三大原因,而Mueller等^[38]则指出通过改善养分管理,大部分农作物的产量增加45%到70%是有可能的。生物性状和光合能力均是影响作物产量形成的基础^[39-40],而改善农田水肥和养分管理策略主要就是通过改善作物的生物性状和光合能力进而提高作物产量。本研究发现,辣椒株高、分蘖数以及净光合速率*Pn*、胞间CO₂浓度*Ci*和蒸腾速率*Tr*均与辣椒产量间存在显著或极显著的相关性,其中除净光合速率*Pn*与辣椒产量符合一元二次模型外,其它因子均与辣椒产量存在显著的线性相关性,说明从简单线性相关的角度来分析,以上因子均可以显著影响辣椒产量。但是,作物产量的形成是由作物生物性状以及叶片光合作用等多种影响因素综合决定的,因此需要综合考虑多个影响因子才是正确的评估方法^[14,41]。本研究通过逐步回归分析将所有影响因子逐个引入回归方程并得到最终的逐步回归方程,结果表明辣椒产量与辣椒叶片的胞间CO₂浓度(*Ci*)以及蒸腾速率(*Tr*)之间存在极显著的相关性,说明在众多的影响因子中,收获期辣

椒叶片的胞间 CO₂ 浓度与蒸腾速率是影响辣椒产量的主导因素,从 WDX 和 BMX 处理也可看出二者的 *Ci* 明显下降,而 *Tr* 则明显升高,说明稳定性和包膜型缓释肥对辣椒收获期光合能力的改善效果显著。

参 考 文 献:

[1] 罗龙皂,李 渝,张文安,等.长期施肥下黄壤旱地玉米产量及肥料利用率的变化特征[J].应用生态学报,2013,24(10):2793-2798.

[2] 蒋太明,魏朝富,谢德体,等.贵州中部喀斯特地区黄壤持水性能的研究[J].水土保持学报,2006,20(6):25-29.

[3] 张文源,王百田,杨光橄,等.喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J].生态环境学报,2014,23(11):1776-1782.

[4] 刘 方,黄昌勇,何腾兵,等.不同类型黄壤旱地的磷素流失及其影响因素分析[J].水土保持学报,2001,15(2):37-40.

[5] 任卫卫,付小松,张万萍,等.贵州地方辣椒品种资源主要类别、分布及利用潜力[J].长江蔬菜,2015,(2):6-12.

[6] 张绍刚.贵州辣椒产业发展与品种需求分析[J].中国蔬菜,2011,(21):18-19.

[7] 周志红,李心清,邢 英,等.生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J].地球与环境,2011,39(2):278-284.

[8] 赵秉强.新型肥料[M].北京:科学出版社,2013.

[9] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility [J]. Plant and Soil, 2010,327(1):235-246.

[10] 陈贤友,吴良欢,李金先,等.新型控释肥对水稻产量与氮肥利用率的影响探讨[J].土壤通报,2010,41(1):133-137.

[11] 古慧娟,石元亮,于阁杰,等.我国缓/控释肥料的应用效应研究进展[J].土壤通报,2010,42(1):220-223.

[12] 韩锦峰,朱大恒,刘华山,等.我国烤烟含钾量低的原因及解决途径[J].河南农业科学,2010,(2):32-36.

[13] 陈艳萍,肖 尧,孔令杰,等.缓释肥施用量对超高产夏玉米氮素积累分配的影响[J].中国农学通报,2015,31(27):34-40.

[14] 曹 兵,倪小会,肖 强,等.包膜尿素对温室番茄产量、品质和经济效益的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):389-395.

[15] 于淑芳,杨 力,张 民,等.控释肥对小麦玉米生物学性状和土壤硝酸盐积累的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(1):128-133.

[16] 刘彦伶,来 庆,徐早增,等.不同氮肥类型对黄泥田双季稻产量及氮素利用的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2013,39(4):403-412.

[17] Daniel P, Gilles L. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration[J]. Plant and Soil, 2000,216:65-82

[18] 赵 营,赵天成,王世荣.缓/控释肥在土壤中的氮素释放特征及其对春玉米氮吸收的影响[J].中国农学通报,2015,31(17):163-168.

[19] Sun L, Gu L L, Peng X L, et al. Effects of nitrogen fertilizer application time on dry matter accumulation and yield of Chinese potato va-

riety KX 13[J]. Potato Research, 2012,55(3-4):303-313.

[20] 杨利军,韩晓日,战秀梅,等.新型缓释尿素对玉米和水稻产量、氮肥利用率及无机氮残留的影响[J].沈阳农业大学学报,2012,43(2):184-188.

[21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[22] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems[J]. Field Crops Research, 2011,121(3):430-440.

[23] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use and Management, 2011,27(1):110-115.

[24] 王 寅,冯国忠,张天山,等.控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J].中国农业科学,2016,49(3):518-528.

[25] 李长洲.新型大球包膜控释肥养分释放特征及肥效研究[D].山东农业大学,2013.

[26] 樊小林,刘 芳,廖照源,等.我国控释肥料研究的现状和展望[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.

[27] 王素萍,李小坤,鲁剑巍,等.施用控释尿素对油菜籽产量、氮肥利用率及土壤无机氮含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1449-1456.

[28] 董 燕.缓/控释复合肥料养分释放特性与生物效应研究[D].重庆:西南大学,2007.

[29] 韩蔚娟,王 寅,陈海潇,等.黑土区玉米施用新型肥料的效果和环境效应[J].水土保持学报,2016,30(2):307-311.

[30] 胡小凤,王正银,游 媛,等.缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发特性研究[J].环境科学,2010,31(8):1937-1943.

[31] 张 萌,肖厚军,赵 欢,等.贵州黄壤区辣椒干物质、氮素积累与分配及氮素利用对新型肥料的响应[J].应用生态学报,2016,27(9):2983-2990.

[32] 赵 欢,张 萌,秦 松,等.贵州黄壤小白菜生长、品质、光合特性及氮素利用对新型肥料的响应[J].中国生态农业学报,2016,24(10):1320-1327.

[33] 韩玉玲.保水剂对辣椒生长及水肥高效利用的研究[D].南京:南京农业大学,2013.

[34] 喻懿之.西南玉米几种新型肥料一次性施用效果的研究[D].成都:四川农业大学,2013.

[35] 许大全.光合作用气孔限制分析中的一些问题[J].植物生理学通讯,1997,33(4):241-244.

[36] 陈根云,陈 娟,许大全.关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J].植物生理学通讯,2010,46(1):64-66.

[37] 范 兰,吕昌河,陈 朝.作物产量差及其形成原因综述[J].自然资源学报,2011,26(12):2155-2166.

[38] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management [J]. Nature, 2012, 490(7419):254-257.

[39] 战秀梅,韩晓日,佟 晔,等.高产施肥条件下玉米的光合特性研究[J].杂粮作物,2008,28(4):251-254.

[40] 董 燕,王正银.缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用[J].生态学报,2010,30(24):6707-6714.

[41] 贺江舟,龚明福,范君华,等.逐步回归及通径分析在主成分分析中的应用[J].新疆农业科学,2010,47(3):431-437.