

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.014

孟超然, 白如霄, 候建伟, 等. 有机肥替代部分化肥对干旱区滴灌玉米养分吸收及产量影响. 土壤, 2020, 52(4): 750–757.

## 有机肥替代部分化肥对干旱区滴灌玉米养分吸收及产量影响<sup>①</sup>

孟超然<sup>1</sup>, 白如霄<sup>2</sup>, 候建伟<sup>3</sup>, 张新疆<sup>1</sup>, 张皓禹<sup>1</sup>, 危常州<sup>1\*</sup>

(1 石河子大学农学院/新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003; 2 新疆生产建设兵团第九师农业科学研究所, 新疆塔城 834600; 3 昭苏自治区级农业科技园区, 新疆昭苏 835600)

**摘要:** 新疆是玉米高产区, 但高产往往建立在化肥大量施用的前提下, 研究有机肥替代部分化肥对新疆北疆干旱区滴灌玉米植株养分吸收及产量的影响, 可为该地区化肥施用减量、生产成本降低、养分效率提高的新型施肥模式提供科学依据。通过田间小区试验, 比较化肥和有机肥氮磷钾养分投入合计量相同, 且生物有机肥替代 8%、16%、24% 化肥氮, 或生物有机肥、牛粪、羊粪、玉米秸秆替代 16% 化肥氮对玉米养分吸收、产量、氮素效率及经济效益的影响。结果表明: 与单施化肥相比, 有机肥替代部分化肥可增加玉米干物质花后积累比例 3.23%~11.81%, 氮、钾养分花后吸收比例最大分别增加 19.45%、15.44%, 增加玉米产量 8.50%~21.00%。有机肥替代部分化肥下总氮素表观利用率、偏生产力、生理利用率、贡献率较单施化肥最大分别增加了 12.04%、9.36%、29.64%、12.63%, 经济效益最大增加 65.08%。较短年限内以生物有机肥氮替代 8% 或以牛、羊粪氮替代 16% 化肥氮是此研究推荐的施肥方案。

**关键词:** 干旱区; 玉米; 有机肥氮; 化肥氮; 养分吸收; 产量

中图分类号: S141.9 文献标志码: A

### Effects of Organic Materials Partially Substituting Chemical Fertilizer on Nutrient Uptake and Yield of Maize Under Drip Irrigation in Arid Region

MENG Chaoran<sup>1</sup>, BAI Ruxiao<sup>2</sup>, HOU Jianwei<sup>3</sup>, ZHANG Xinjiang<sup>1</sup>, ZHANG Haoyu<sup>1</sup>, WEI Changzhou<sup>1\*</sup>

(1 College of Agronomy, Shihezi University/Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2 Institute of Agricultural Science, 9<sup>th</sup> Division, Xinjiang Production and Construction Corps, Tacheng, Xinjiang 834600, China; 3 Zhaosu Municipal Agricultural Science and Technology Park, Zhaosu, Xinjiang 835600, China)

**Abstract:** Maize yield in Xinjiang has reached a high level based on large-amount application of chemical fertilizers. It can provide a scientific basis for a new fertilization mode reducing fertilizer application and agricultural cost and improving nutrient efficiency in the arid region of northern Xinjiang to study the effects of chemical fertilizer partially substituted by organic materials on the nutrient uptake and yield of drip-irrigated maize. A field experiment was conducted to compare the differences in nutrient uptake, nitrogen efficiency and maize yield among no N fertilizer treatment, single chemical fertilizer treatment, bio-organic fertilizer substituting 8%, 16%, 24% chemical fertilizer treatments and bio-organic fertilizer, cow manure, sheep manure, corn straw substituting 16% chemical fertilizer treatments. The results showed that chemical fertilizer partially substituted by organic materials increased the post-anthesis accumulation ratio of maize dry matter by 3.23%–11.81% and increased the absorption ratios of nitrogen and potassium by 19.45% and 15.44%, respectively, and increased maize yield by 8.50%–21.00% compared with single chemical fertilizer treatment. Under the treatments of chemical fertilizer partially substituted by organic materials, the apparent utilization rate, partial productivity, physiological utilization rate and contribution rate of total nitrogen increased by 12.04%, 9.36%, 29.64% and 12.63%, respectively, and the maximum benefit increased by 65.08% compared with single chemical fertilizer treatment. Replacing 8% chemical fertilizer with bio-organic fertilizer or replacing 16% chemical fertilizer with cow or sheep manure is the recommended in a short period in this study.

**Key words:** Arid Region; Maize; Organic fertilizer; Nutrient Uptake; Yield

①基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2017YFD0201808)和新疆兵团区域创新引导计划项目(2018BB020)资助。

\* 通讯作者(czwei@shzu.edu.cn)

作者简介: 孟超然(1990—), 男, 河南开封人, 硕士, 主要研究方向为新型肥料与现代施肥技术。E-mail: chaoranmeng@163.com

我国人口众多, 约占全球人口的 18.7%, 而耕地面积仅占全球耕地面积的 7.5%<sup>[1]</sup>, 粮食安全的耕地压力使化肥大量施用在我国成为普遍现象<sup>[2]</sup>, 据统计, 我国化肥施用量为全球化肥施用量的 31%<sup>[1]</sup>。大量施用化肥虽然在一定程度上保证了粮食安全, 但同时造成了严重的环境污染和农业生产成本上升<sup>[3]</sup>, 给土壤质量和农业生产的持续发展带来新的挑战。为提高肥料利用率, 减少不合理投入, 保障粮食等主要农产品有效供给, 促进农业可持续发展, 农业部制订了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》<sup>[4]</sup>, 提出到 2020 年我国要实现化肥“零增长”的战略目标。

玉米作为重要的粮饲兼用作物以及重要的工业原材料<sup>[5]</sup>, 在保障粮食安全方面具有重要战略意义。我国北方玉米农民习惯施肥量氮(N)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O) 肥分别为 224、62、49 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>, 但氮肥、磷肥、钾肥利用率仅分别为 32%、25%、43%<sup>[7]</sup>, 农民因盲目追求高产而大量施化肥、施肥结构不合理等是造成这种现象的主要原因。而化肥长期大量施用的负面影响也逐渐凸显出来, 例如, 肥料利用率不高(30%左右)<sup>[8]</sup>、氮肥的淋溶和磷素的固定<sup>[9]</sup>、病虫害的加重、农产品质量的下降<sup>[10]</sup>。如何在高产、高收益条件下通过改善玉米施肥技术, 降低化肥的施用量是一项亟待解决的重大问题。目前的研究中, 通过有机肥替代部分化肥, 降低化肥施用量、提高肥料利用率、提高作物产量是一项重要研究领域, 但在新疆干旱区滴灌条件下此类研究相对缺乏。此试验以新疆北疆干旱区滴灌玉米为研究对象, 探索有机肥替代部分化肥下玉米干物质积累、养分吸收特征及其对玉米产量的影响, 寻求适用于该地区特殊水肥管理模式的有机肥替代部分化肥方案, 为该地区节肥增效的新型农业生产模式提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2017 年 4—10 月在新疆维吾尔自治区石河子市石河子大学农学院试验站进行。石河子市地处天山北麓中段, 准噶尔盆地南缘, 属典型的温带大陆性气候, 年均气温 7~8 °C, 年日照时长 2 721~2 818 h, 无霜期 168~171 d, 年降水量 180~270 mm, 蒸发量 1 000~1 500 mm。供试土壤类型为灌耕灰漠土, 基本理化性状为: 有机质 25.74 g/kg, 碱解氮 42.63 mg/kg, 有效磷 10.46 mg/kg, 速效钾 138.84 mg/kg, pH 7.80。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为饲用玉米 SC704, 采用机械点播, 覆膜种植, 一膜四行, 株距为 25 cm, 行距配置 30 cm + 60 cm + 30 cm, 理论密度为 8.8 × 10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>, 其他栽培管理措施参照当地常规管理方法。设计 8 个处理, 对照处理: ①CK, 无氮对照; ②CF, 单施化肥, 常规施肥对照。不同比例下有机肥替代部分化肥处理: ③CF+8%OF, 8% N 由生物有机肥提供; ④CF+16%OF, 16% N 由生物有机肥提供; ⑤CF+24%OF, 24% N 由生物有机肥提供。不同种类有机肥替代部分化肥处理: ⑥CF+16%CM, 16% N 由牛粪提供; ⑦CF+16%SM, 16% N 由羊粪提供; ⑧CF+16%SR, 16% N 由玉米秸秆提供。试验所用有机肥养分含量分别为, 生物有机肥: N 30.0 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 20.0 g/kg, K<sub>2</sub>O 20.0 g/kg; 牛粪: N 10.6 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 6.3 g/kg, K<sub>2</sub>O 13.4 g/kg; 羊粪: N 15.9 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.1 g/kg, K<sub>2</sub>O 14.7 g/kg; 秸秆: N 11.5 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.6 g/kg, K<sub>2</sub>O 6.8 g/kg, 其中生物有机肥有效活菌数为 0.5 亿/g, 有机质含量为 45%。有机肥均在春季农田翻耕时施入。各处理重复 3 次, 各重复面积 20 m<sup>2</sup>, 完全随机排列。各处理养分投入量如表 1 所示。

表 1 各处理养分投入量  
Table 1 Nutrient input of each treatment

处理	化肥养分投入(kg/hm <sup>2</sup> )			有机肥养分投入(kg/hm <sup>2</sup> )		
	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	120.00	90.00	0	0	0
CF	300.00	120.00	90.00	0	0	0
CF+8%OF	276.00	104.00	74.00	24.00	16.00	16.00
CF+16%OF	252.00	88.00	58.00	48.00	32.00	32.00
CF+24%OF	228.00	72.00	42.00	72.00	48.00	48.00
CF+16%CM	252.00	91.47	39.32	48.00	28.53	60.68
CF+16%SM	252.00	107.62	55.62	48.00	12.38	44.38
CF+16%SR	252.00	100.80	59.10	48.00	19.20	40.90

### 1.3 测定项目和方法

植株干物质积累动态:在玉米拔节初期(出苗 39 d)、大喇叭口期(出苗 58 d)、抽雄期(出苗 93 d)、成熟期(出苗 123 d)采集植株样品,各重复每次采 3 株有代表性的玉米植株,分器官于 105 °C 杀青 30 min,后于 85 °C 烘干称重。

植株养分吸收动态:每次采集的植株样品烘干样品粉碎后用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,以奈氏比色法测全氮含量,钒钼黄比色法测全磷含量,火焰光度计法测全钾含量。

产量:在玉米成熟后,各重复选取 6.67 m<sup>2</sup> 面积对玉米产量进行测定,同时测定各穗穗行数、行粒数及千粒重。

氮素效率:氮素表观利用率(%)=(N-N<sub>0</sub>)/F×100,表征作物对肥料中 N 的回收效率;

氮素偏生产力(kg/kg)=Y/F,指单位氮肥所生产的作物产量;

氮素生理利用率(kg/kg)=(Y-Y<sub>0</sub>)/(N-N<sub>0</sub>),指作物吸收单位氮素获得的籽粒产量增加量;

氮素贡献率(%)=(Y-Y<sub>0</sub>)/Y×100,指施氮量增加的产量占总产量的比率。

式中:Y 和 Y<sub>0</sub> 分别为施氮处理和 CK 处理所获得的玉米籽粒产量,N 和 N<sub>0</sub> 分别为施氮和不施氮处理作物地上部氮素吸收总量,F 为氮素投入量。

### 1.4 数据处理

利用 Excel 2016 进行数据存储和整理,SPSS PASW Statistics 18.0 对数据作统计学分析。

## 2 结果

### 2.1 有机肥替代部分化肥对玉米产量及产量构成的影响

各处理玉米产量及其构成要素如表 2 所示。各有机肥替代部分化肥处理玉米产量除 CF+24%OF 均显著大于 CF 处理。不同替代比例下玉米产量表现为 CF+8%OF > CF+16%OF > CF+24%OF > CF,有机肥替代 8%、16%、24% 化肥较单施化肥分别增产 13.81%、10.50%、8.50%;不同有机肥种类处理产量表现为 CF+16%SM > CF+16%CM > CF+16%SR > CF+16%OF > CF,分别较 CF 增产 21.00%、13.51%、13.08%、10.50%。产量构成因素分析结果显示,玉米产量差异主要来源于各处理玉米行粒数和千粒重之间的差异。

表 2 不同处理对玉米产量及其构成要素的影响  
Table 2 Maize yields and its components under various fertilization treatments

处理	产量(t/hm <sup>2</sup> )	行粒数(粒)	穗行数(行)	穗粒数(粒)	千粒重(g)
CK	9.73 d	33.30 c	13.51 a	450.36 b	200.71 b
CF	13.36 c	37.66 bc	13.46 a	507.56 ab	272.96 a
CF+8%OF	15.21 ab	42.04 ab	13.23 a	556.28 a	275.56 a
CF+16%OF	14.77 b	40.13 ab	13.37 a	536.15 a	271.21 a
CF+24%OF	14.50 bc	39.83 ab	12.73 a	500.23 ab	272.64 a
CF+16%CM	15.17 ab	44.97 a	12.80 a	577.07 a	286.79 a
CF+16%SM	16.17 a	41.96 ab	12.81 a	537.60 a	304.26 a
CF+16%SR	15.11 ab	39.63 ab	13.47 a	533.53 a	297.78 a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下表同。

### 2.2 有机肥替代部分化肥对玉米干物质积累的影响

对玉米干物质积累量的记录分析结果如表 3 所示。玉米干物质积累速率总体表现为成熟期最大,大喇叭口期次之,拔节初期最小的规律。不同替代比例处理玉米干物质积累量拔节初期、大喇叭口期和抽雄期均小于 CF 处理,至成熟期则表现为 CF+8%OF > CF+16%OF > CF > CF+24%OF > CK。不同有机肥种类处理间玉米干物质积累量拔节初期、大喇叭口期和抽

雄期均无显著差异,且均小于 CF 处理,成熟期表现为 CF+16%SM > CF+16%SR > CF+16%OF > CF+16%CM > CF > CK。花后积累比例指玉米抽雄期至成熟期干物质积累量占积累总量的比值,有机肥替代部分化肥处理玉米干物质花后积累比例均大于单施化肥处理,CF+8%OF、CF+16%OF 和 CF+24%OF 较 CF 分别提高 4.95%、3.23% 和 4.26%,CF+16%OF、CF+16%CM、CF+16%SM 和 CF+16%SR 较 CF 分别提高 3.23%、3.14%、11.81% 和 10.64%。

表 3 不同处理对玉米单株干物质积累的影响  
Table 3 Maize dry matter accumulation per plant under various fertilization treatments

处理	拔节初期		大喇叭口期		抽雄期		成熟期		花后积累比例(%)
	DM	AR	DM	AR	DM	AR	DM	AR	
CK	16.71 a	0.43	56.10 c	2.19	108.44 c	1.50	204.93 c	3.22	47.08
CF	20.22 a	0.52	76.24 a	3.11	138.51 a	1.78	280.33 b	4.73	50.59
CF+8%OF	18.69 a	0.48	69.57 ab	2.83	134.05 ab	1.84	301.53 ab	5.58	55.54
CF+16%OF	16.84 a	0.43	67.49 ab	2.81	136.40 a	1.97	295.37 ab	5.30	53.82
CF+24%OF	16.25 a	0.42	57.09 c	2.27	125.65 ab	1.96	278.33 b	5.09	54.85
CF+16%CM	18.66 a	0.48	65.27 ab	2.59	133.80 ab	1.96	289.20 ab	5.18	53.73
CF+16%SM	16.47 a	0.42	65.87 ab	2.74	122.41 b	1.62	325.53 a	6.77	62.40
CF+16%SR	16.18 a	0.41	61.61 b	2.52	115.43 bc	1.54	297.73 ab	6.08	61.23

注: DM: 干物质积累量(g/plant); AR: 每株玉米阶段干物质积累速率(g/d)。

### 2.3 有机肥替代部分化肥对玉米养分吸收的影响

有机肥替代部分化肥下玉米氮养分吸收特征如表 4 所示。玉米氮养分吸收速率总体表现为成熟期最大, 大喇叭口期次之, 拔节初期最小的规律。不同替代比例处理玉米氮养分吸收量出苗至抽雄期各阶段与 CF 无显著差异; 成熟期以 CF+8%OF 吸收量最大, 显著大于 CF+24%OF 和 CF; 氮养分吸收总量表现为 CF+8%OF > CF+16%OF > CF > CF+24%OF。不同有

机肥种类处理玉米氮养分吸收量拔节初期与 CF 无显著差异; 拔节至抽雄期以 CF 最大, 且 CF+16%CM、CF+16%SM 及 CF+16%SR 均小于 CF+16%OF; 成熟期各处理玉米氮养分吸收量则均显著大于 CF; 吸收总量 CF+16%SM > CF+16%OF > CF+16%CM > CF > CF+16%SR。有机肥替代部分化肥均可较单施化肥提高玉米植株花后氮养分积累比例, 增幅以 CF+16%CM 和 CF+16%SM 最大, 达 19.45%。

表 4 不同处理对玉米氮素吸收的影响  
Table 4 Maize nitrogen uptake under various fertilization treatments

处理	花前									氮养分吸收总量
	拔节初期		大喇叭口期		抽雄期		花后			
	NUA	NUR	NUA	NUR	NUA	NUR	NUA	NUR	NUP	
CK	0.24 a	6.15	0.62 abc	32.63	0.48 c	13.71	1.06 e	35.33	44.17	2.40 c
CF	0.37 a	9.49	0.74 a	38.95	1.26 a	36.00	1.38 cd	46.00	36.80	3.75 ab
CF+8%OF	0.41 a	10.51	0.68 ab	35.79	1.28 a	36.57	1.80 b	60.00	43.17	4.17 a
CF+16%OF	0.31 a	7.95	0.68 ab	35.79	1.23 a	35.14	1.64 bc	54.67	42.49	3.86 ab
CF+24%OF	0.26 a	6.67	0.62 abc	32.63	1.30 a	37.14	1.13 d	37.67	34.14	3.31 b
CF+16%CM	0.35 a	8.97	0.55 c	28.95	0.78 b	22.29	2.16 a	72.00	56.25	3.84 ab
CF+16%SM	0.32 a	8.21	0.65 abc	34.21	0.85 b	24.29	2.34 a	78.00	56.25	4.16 a
CF+16%SR	0.31 a	7.95	0.57 bc	30.00	0.79 b	22.57	1.78 b	59.33	51.59	3.45 b

注: NUA: 阶段养分吸收量(g/plant); NUR: 每株玉米阶段养分吸收速率(mg/d); NUP: 阶段养分吸收量占吸收总量的比例(%)。下表同。

与氮养分吸收规律相同, 玉米各生育阶段磷养分吸收速率同样表现为成熟期最大, 大喇叭口期次之, 拔节初期最小变化规律(表 5)。玉米拔节初期、抽雄期、成熟期磷养分吸收量各替代比例处理间及与 CF 均无显著差异, 大喇叭口期则表现为 CF+24%OF > CF+8%OF = CF+16%OF > CF, 各替代比例处理均显著大于 CF, 磷养分吸收总量 CF+8%OF > CF > CF+16%OF > CF+24%OF。不同种类有机肥处理玉米

磷养分吸收量除 CF+16%OF 在大喇叭口期显著大于 CF, CF+16%SM 和 CF+16%SR 在成熟期显著低于 CF, 其余各处理在各阶段均与 CF 无显著差异; 磷养分吸收总量 CF+16%CM > CF > CF+16%OF > CF+16%SM > CF+16%SR。

与氮、磷养分吸收规律不同, 玉米钾养分吸收最大速率出现在大喇叭口期, 其余阶段吸收速率均明显低于此阶段(表 6)。大部分有机替代处理间玉米钾养

表 5 不同处理对玉米磷素吸收特征  
Table 5 Maize phosphorous uptake under various fertilization treatments

处理	花前						花后			磷养分吸收总量
	拔节初期		大喇叭口期		抽雄期		成熟期			
	NUA	NUR	NUA	NUR	NUA	NUR	NUA	NUR	NUP	
CK	0.04 b	1.03	0.15 d	7.89	0.07 c	2.00	0.54 d	18.00	67.50	0.80 d
CF	0.09 a	2.31	0.22 c	11.58	0.10 ab	2.86	0.80 ab	26.67	66.12	1.21 abc
CF+8%OF	0.08 a	2.05	0.27 ab	15.26	0.10 ab	2.86	0.84 a	28.00	64.12	1.31 a
CF+16%OF	0.06 a	1.54	0.27 ab	14.21	0.11 a	3.14	0.76 ab	25.33	63.33	1.20 abc
CF+24%OF	0.07 a	1.79	0.29 a	14.21	0.10 ab	2.86	0.75 ab	21.67	68.81	1.09 bc
CF+16%CM	0.06 a	1.54	0.25 abc	13.16	0.09 b	2.57	0.74 ab	28.00	59.68	1.24 ab
CF+16%SM	0.09 a	2.31	0.25 abc	13.16	0.09 b	2.57	0.68 bc	22.67	61.26	1.11 abc
CF+16%SR	0.08 a	2.05	0.23 bc	12.11	0.09 b	2.57	0.61 c	20.33	60.40	1.01 c

表 6 不同处理对玉米钾素吸收特征  
Table 6 Maize potassium uptake under various fertilization treatments

处理	花前						花后			钾养分吸收总量
	拔节初期		大喇叭口期		抽雄期		成熟期			
	NUA	NUR	NUA	NUR	NUA	NUR	NUA	NUR	NUP	
CK	0.10 d	2.56	0.78 a	41.05	0.25 e	7.14	0.13 e	4.33	10.32	1.26 c
CF	0.26 a	6.67	0.83 a	43.68	0.44 cd	12.57	0.15 de	5.00	8.93	1.68 b
CF+8%OF	0.27 a	6.92	0.73 a	38.42	0.57 ab	16.29	0.20 cd	6.67	11.30	1.77 b
CF+16%OF	0.23 abc	5.90	0.77 a	40.53	0.58 ab	16.57	0.19 cd	6.33	10.73	1.77 b
CF+24%OF	0.19 ab	4.87	0.71 a	37.37	0.60 a	17.14	0.21 c	7.00	12.28	1.71 b
CF+16%CM	0.21 bc	5.38	0.78 a	41.05	0.39 d	11.14	0.44 ab	14.67	24.18	1.82 ab
CF+16%SM	0.24 ab	6.15	0.79 a	41.58	0.46 cd	13.14	0.48 a	16.00	24.37	1.97 a
CF+16%SR	0.23 abc	5.90	0.69 a	36.32	0.50 bc	14.29	0.42 b	14.00	22.83	1.84 ab

分吸收量拔节初期、大喇叭口期均无显著差异，且与 CF 差异均未达到显著水平。抽雄期、成熟期各替代比例处理钾养分吸收量均大于 CF，钾养分吸收总量 CF+8%OF = CF+16%OF > CF+24%OF > CF。不同有机肥种类处理间玉米钾养分吸收量拔节初期、大喇叭口期同样无显著差异。CF+16%CM、CF+16%SM、CF+16%SR 在抽雄期钾养分吸收量显著低于 CF+16%OF，且与 CF 差异不显著，但至成熟期则显著大于 CF+16%OF 和 CF。钾养分吸收总量 CF+16%SM > CF+16%SR > CF+16%CM > CF+16%OF > CF。CF+16%SM 处理玉米花后钾养分积累比例增幅最大，达 15.44%。

#### 2.4 有机肥替代部分化肥对氮素利用率及经济效益的影响

对各处理氮素利用率分析结果如表 7 所示。可以看出有机肥替代部分化肥处理各氮素利用率指标较 CF 均有不同程度的增高。化肥氮素观利用率以

CF+16%SM 最大，较 CF 提高了 21.36%，总氮表观利用率以 CF+8%OF 最大，较 CF 提高了 12.04%；化肥氮素偏生产力以 CF+16%SM 最大，较 CF 提高了 19.62%，总氮偏生产力以 CF+16%SM 最大，比 CF 大 9.36%。氮素生理利用率最大的处理为 CF+24%OF，氮素贡献率最大者为 CF+16%SM 处理，分别较 CF 增加 29.64%、12.63%。需要指出的是总氮表观利用率 CF+24%OF、CF+16%SR 显著低于 CF，但二者氮素生理利用率与氮素贡献率则显著大于 CF。

对各处理经济效益分析结果如表 8 所示。不同替代比例处理以 CF+8%OF 效益最大，CF+8%OF、CF+16%OF、CF+24%OF 较 CF 效益分别增加 1 455.90、-63.15、-1 355.25 元/hm<sup>2</sup>，分别提高了 26.64%、-1.16%、-24.80%。不同有机肥种类处理经济效益以 CF+16%SM 最大，较 CF 增加 3 556.05 元/hm<sup>2</sup>，提高了 65.08%，其他处理也有不同程度的提高。

表7 不同处理对氮素利用率的影响  
Table 7 N efficiency under various fertilization treatments

处理	氮素表观利用率(%)		氮素偏生产力(kg/kg)		氮素生理利用率(kg/kg)	氮素贡献率(%)
	化肥氮	总氮	化肥氮	总氮		
CF	38.70 c	38.70 b	44.54 b	44.54 a	31.29 c	27.19 c
CF+8%OF	55.15 ab	50.74 a	55.10 a	50.70 a	35.99 bc	36.02 ab
CF+16%OF	49.83 b	41.85 b	58.60 a	49.22 a	40.11 b	34.11 ab
CF+24%OF	34.32 c	26.09 c	63.59 a	48.33 a	60.93 a	32.89 bc
CF+16%CM	49.14 b	41.28 b	60.19 a	50.56 a	43.91 b	35.85 ab
CF+16%SM	60.06 a	50.45 a	64.16 a	53.90 a	42.54 b	39.82 a
CF+16%SR	35.83 c	30.10 c	59.96 a	50.37 a	59.59 a	35.61 ab

表8 不同处理的化肥经济效益(元/hm<sup>2</sup>)  
Table 8 Economic benefits under various fertilization treatments

处理	生产投入			总投入	产值	效益
	化肥	有机肥	其他			
CK	1 113.90	0.00	9 750.00	10 863.90	12 649.05	1 785.15
CF	2 157.45	0.00	9 750.00	11 907.45	17 371.65	5 464.20
CF+8%OF	1 901.40	1 200.00	9 750.00	12 851.40	19 771.50	6 920.10
CF+16%OF	1 645.35	2 400.00	9 750.00	13 795.35	19 196.40	5 401.05
CF+24%OF	1 389.45	3 600.00	9 750.00	14 739.45	18 848.25	4 108.95
CF+16%CM	1 549.95	525.00	9 750.00	11 824.95	19 718.25	7 893.30
CF+16%SM	1 725.00	525.00	9 750.00	12 000.00	21 020.25	9 020.25
CF+16%SR	1 713.15	300.00	9 750.00	11 763.15	19 643.85	7 880.70

注: 生物有机肥价格为2 000元/t, 牛粪、羊粪施用成本主要为运输费, 秸秆施用成本主要为秸秆粉碎费。

### 3 讨论

#### 3.1 有机肥替代部分化肥对玉米干物质积累和产量的影响

高产是农业生产追求的首要目标, 本研究发现各处理产量相对较高者干物质积累量也相对较大, 这与黄振喜等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。说明充足的干物质积累是高产形成的前提条件。关于有机肥替代部分化肥对作物生长影响的研究目前已有许多, 吴迪等<sup>[12]</sup>的研究表明, 化肥配施有机肥可显著提高春玉米干物质最大积累速率和总积累量, 为获得较高玉米籽粒产量提供了物质基础, 最终增产 20.40%。姜佰文等<sup>[13]</sup>的研究表明, 有机肥替代部分化肥可提高水稻干物质积累量 26.90%, 增产 22.60%。本研究以不同替代比例及不同种类有机肥替代化肥, 除 CF+24%OF 均使玉米干物质积累量较 CF 有所提高, 最终可使玉米增产 8.50%~13.81%, 说明在本研究区特殊的水肥管理模式下有机肥替代部分化肥同样可以对作物生长产生积极的影响, 究其原因, 可能是有机肥替代部分化肥较单施化肥土壤养分供应能力不同, 导致玉米植株养

分吸收特征不同, 这可能同时也是本试验中 CF+24%OF 玉米植株干物质积累量低于 CF 的主要原因。但干物质积累量增加并不意味着作物产量提高, 如: 生长前期干物质积累过快是造成玉米倒伏的主要原因, 严重影响产量。有研究指出, 玉米吐丝后干物质积累对产量影响最大<sup>[14]</sup>, 因此提高玉米花后干物质积累比例是保证高产的重要措施。崔红艳等<sup>[15]</sup>的研究表明有机无机肥配施促进了胡麻蕾期后的干物质积累, 聂俊等<sup>[16]</sup>的研究表明配施有机肥可以提高水稻分蘖期至成熟期的干物质积累, 本研究发现有机肥替代部分化肥可明显提高玉米干物质花后积累比例, 以 CF+16%SM 增幅最大, 为 11.81%, 其原因同样可以归结于有机肥替代部分化肥对植株养分吸收的影响。

#### 3.2 有机肥替代部分化肥对玉米养分吸收的影响

干物质积累是作物产量形成的前提, 养分吸收则是干物质积累的基础。本研究发现, 玉米植株氮养分吸收速率最快的阶段为成熟期, 此阶段同样为氮吸收量最大阶段, 占整个生育期吸收量的 36.80%~56.25%, 这与崔海岩等<sup>[14]</sup>的研究结果相似。田昌等<sup>[17]</sup>

的研究发现,有机肥氮替代 10% 化肥氮较单施化肥可增加冬油菜氮养分吸收量,而 30%、50% 替代比例下则有所降低,与其研究结果相似,本研究中玉米各阶段氮养分吸收量  $CF+8\%OF > CF > CF+16\%OF > CF+24\%OF$ ,说明较高的替代比例存在减少作物氮养分吸收量的风险,其原因可能是替代比例大则化肥减量多,且有机肥需要经过一系列较长时限的自身养分释放<sup>[18]</sup>、土壤养分活化等<sup>[19]</sup>,才能对作物养分吸收产生积极影响,故导致养分总体供应不足。这也解释了本研究中  $CF+24\%OF$  未能使玉米干物质积累量较  $CF$  有所提高,  $CF+16\%CM$ 、 $CF+16\%SR$  同样明显存在此现象,则需要同时考虑有机物料特性,试验所用生物有机肥含有效活菌数 0.5 亿/g,一方面可直接作用于作物根际,刺激作物生长、提高土壤肥力和抑制有害微生物的活动;另一方面,有机肥物料需要经过微生物发酵分解,才可以被植物吸收利用,而有效活菌可对此过程产生促进作用,加之牛粪、羊粪、玉米秸秆腐解时的“掘氮效应”<sup>[20]</sup>,解释了拔节至抽雄期玉米氮素吸收量  $CF+16\%CM$ 、 $CF+16\%SM$  及  $CF+16\%SR$  均小于  $CF+16\%OF$  的现象。基于此类理论,本研究发现的各有机肥替代部分化肥处理均可较单施化肥提高玉米植株花后氮素积累比例,且以  $CF+16\%CM$  和  $CF+16\%SM$  增幅最大的现象也得以解释,而各有机肥替代部分化肥处理玉米产量均较单施化肥有所提高,说明玉米植株氮养分吸收时期对产量形成而言非常重要。

与玉米植株氮养分吸收特征相似,磷养分同样以成熟期吸收速率最大、吸收量最大,占整个生育期吸收总量的 60% 以上。因磷素的特殊性质,磷肥施入土壤后仅能在较短时间内增加土壤有效磷含量<sup>[21]</sup>,加之本研究区石灰性土壤条件,磷肥肥效更易受限。本研究中拔节初至抽雄期各有机肥替代部分化肥处理玉米植株磷养分吸收量普遍大于  $CF$ ,且以  $CF+24\%OF$  最大,说明有机肥替代部分化肥可以提高磷肥的有效性,这与很多研究结果相似<sup>[22-23]</sup>,其主要原因可能是有机肥分解产生的有机酸、携入土壤的有机质促进了无效态磷向有效态的转化<sup>[24]</sup>。

玉米钾养分吸收规律与氮、磷养分吸收明显不同。本研究发现,玉米对钾养分吸收速率、吸收量最大的时期在拔节至大喇叭口期,而花后积累比例仅为 8.93%~24.37%,这与何萍等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。本研究中,出苗至大喇叭口期各阶段不同施肥处理玉米钾养分吸收量并无较大差异,可能是因为钾肥作为基肥一次投入,且研究区土壤速效钾含量较高,玉米钾

养分吸收未受限制。大喇叭口至成熟期,大部分有机肥氮替代部分化肥氮处理玉米钾养分吸收量较  $CF$  显著增加,则可能是因为前期钾养分的大量吸收导致土壤速效钾含量降低,而配施有机肥,增加了此阶段土壤速效钾含量及有效性。这与徐明岗等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。有研究指出<sup>[27]</sup>,钾肥后移并不能提高玉米产量,但增加生长后期钾养分吸收量,对提高玉米籽粒品质十分重要<sup>[28]</sup>。

### 3.3 有机肥替代部分化肥优化方案分析

目前关于有机肥替代部分化肥的研究较多,但没有统一替代方法。有研究者单纯通过增施有机肥<sup>[29]</sup>,或通过搭配若干个既定的化肥、有机肥用量<sup>[30]</sup>,进行化肥配施有机肥的研究。也有研究者以有机肥中全氮含量为计算标准,设计不同的化肥和有机肥比例<sup>[31]</sup>,本研究采用这种替代方法,一方面考虑到养分供给对作物生长的重要性,另一方面也符合化肥减量施用的要求,兼顾化肥和有机肥效率,降低生产投入。研究结果显示,各有机肥替代部分化肥处理较  $CF$  均不同程度地提高了氮素偏生产力、生理利用率及贡献率,但肥料总氮素表观利用率  $CF+24\%OF$ 、 $CF+16\%SR$  显著低于  $CF$ ,可能是上文所述有机物料养分释放慢、腐解过程“掘氮效应”在较短年限下的具体表现。说明较短年限内不宜采用有机肥替代较大比例化肥的方案,同时需要充分考虑有机物料特性,而长期施行下的有机肥替代部分化肥适用方案则需要进一步研究。农业生产效益同样是评价施肥方案优劣的重要指标。目前市面上生物有机肥价格较高,在 2000 元/t 左右,本研究在不同比例下以生物有机肥替代化肥,均增加了农业生产投入,严重影响农民对此方案的接受程度。考虑到研究区畜牧业发达,牛羊粪资源丰富,且其施用成本低廉,因此施用牛羊粪进行有机肥氮替代部分化肥氮较为可取。

## 4 结论

本研究条件下,玉米抽雄后干物质积累及氮、磷养分吸收速率达到最大,积累、吸收量占生育期总量的 50% 以上,钾养分则主要在大喇叭口前吸收;有机肥替代部分化肥对当季玉米磷养分吸收的促进作用主要发生在大喇叭口前,对干物质积累及氮、钾养分吸收的促进作用则发生在抽雄后,增加了玉米花后干物质积累及氮、钾养分吸收比例,显著提高玉米产量;较短年限内以生物有机肥替代 8% 或以牛、羊粪替代 16% 化肥,可达到化肥施用减量、生产效益增加、养分效率提高的目的,是本研究推荐的有机肥

替代部分化肥方案。

### 参考文献:

- [1] 宁吉喆. 国际统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015-2016.
- [2] 罗翔, 曾菊新, 朱媛媛, 等. 谁来养活中国: 耕地压力在粮食安全中的作用及解释[J]. 地理研究, 2016, 35(12): 2216-2226.
- [3] 李亮科. 生产要素利用对粮食增产和环境影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [4] 农业部种植业管理司. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知. 2015-03-18. [http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201503/t20150318\\_4444765.htm](http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm).
- [5] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817.
- [6] 何萍, 徐新朋, 仇少君, 等. 我国北方玉米施肥产量效应和经济效益分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1387-1394.
- [7] 农业部新闻办公室. 科学施肥促进肥料利用率稳步提高我国肥料利用率达33%[J]. 农业工程技术·温室园艺, 2013(10): 89.
- [8] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [9] 牛新湘, 马兴旺. 农田土壤养分淋溶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(3): 451-456.
- [10] 周颖. 化肥施用对农产品质量安全的影响分析[J]. 南方农业, 2016, 10(24): 1-2.
- [11] 黄振喜, 王永军, 王空军, 等. 产量15 000 kg·ha<sup>-1</sup>以上夏玉米灌浆期间的的光合特性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1898-1906.
- [12] 吴迪, 黄绍文, 金继运. 氮肥运筹、配施有机肥和坐水种对春玉米产量与养分吸收转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 317-326.
- [13] 姜佰文, 贾文凯, 王春宏, 等. 氮素调控对寒地玉米氮素积累及产量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(8): 33-37.
- [14] 崔海岩, 靳立斌, 李波, 等. 遮阴对夏玉米干物质积累及养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3099-3105.
- [15] 崔红艳, 胡发龙, 方子森, 等. 有机无机肥配施对胡麻的耗水特性和干物质积累与分配的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 282-288.
- [16] 聂俊, 史亮亮, 邱俊荣, 等. 有机肥和化肥配施对抛栽水稻群体干物质生产和产量的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3): 579-583.
- [17] 田昌, 彭建伟, 宋海星, 等. 有机肥化肥配施对冬油菜养分吸收、籽粒产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(4): 70-74.
- [18] 郑福丽, 张柏松, 崔荣宗, 等. 不同有机物料速效养分释放规律研究[J]. 山东农业科学, 2017, 49(8): 78-81.
- [19] 罗彤. 滴施有机肥酸性浸提物活化石灰性土壤养分的效应研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [20] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J]. 核农学报, 2018, 32(11): 2274-2280.
- [21] 赵红华. 滴灌条件下土壤酸化对石灰性土壤磷锌有效性影响及其生物效应[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [22] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 紫色土减磷配施有机肥的磷肥效应与磷素动态变化[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 207-213, 238.
- [23] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应[J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3525-3532.
- [24] 刘耘华, 卢响军, 陈波浪, 等. 施用有机肥对棉田土壤磷素有效性及棉花产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(4): 667-673.
- [25] 何萍, 金继运. 氮钾互作对春玉米养分吸收动态及模式的影响[J]. 玉米科学, 1999: 68-72.
- [26] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133-3139.
- [27] 张玉芹, 杨恒山, 高聚林, 等. 施钾方式对高产春玉米钾素养分吸收、积累与转运的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(3): 193-198.
- [28] 张水清, 黄绍敏, 聂胜委, 等. 长期定位施肥对夏玉米钾素吸收及土壤钾素动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 56-63.
- [29] 梁尧, 苑亚茹, 韩晓增, 等. 化肥配施不同剂量有机肥对黑土团聚体中有机碳与腐殖酸分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1586-1594.
- [30] Sajjad K, Shad K K, Abdur R, et al. Integrated use of organic and inorganic fertilizers in oat for improving its productivity[J]. European Academic Research, 2014, 2(5): 6559-6567.
- [31] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532-542.