

# 有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体 及玉米产量和品质的影响

周 芸 李永梅 范茂攀 王自林 徐 智 张 丹 赵吉霞

(云南农业大学资源与环境学院, 650201, 云南昆明)

**摘 要** 为研究有机肥等氮替代化肥对土壤结构、玉米产量和品质的影响, 设置有机肥等氮替代化肥的 10% (M10)、20% (M20)、30% (M30)、40% (M40), 以单施化肥 (M0) 和不施肥 (CK) 为对照 6 个施肥处理, 测定玉米不同生育期的土壤团聚体变化状况。结果表明: 随有机肥等氮部分替代化肥比例的增加, 玉米各生育期土壤  $>0.25\text{mm}$  水稳性团聚体 ( $R_{0.25}$ )、平均质量直径 (MWD)、几何平均直径 (GWD) 不断增加, 团聚体破坏率 (PAD)、分形维数 (D) 不断降低。与 M0 处理相比, M30 和 M40 处理显著提高了玉米子粒产量, 表现为  $M30 > M40$ ; M20、M30、M40 处理较 M0 处理玉米子粒蛋白质含量显著增加了 13.29%~25.03%, 淀粉含量显著增加了 39.84%~114.06%, 可溶性糖含量显著增加了 36.49%~54.05%; 蛋白质含量表现为 M30 和 M20 处理显著大于 M40 处理, M30 与 M20 处理间差异不显著; 淀粉含量表现为  $M40 > M30 > M20$ , 差异显著; 可溶性糖含量表现为 M40 和 M30 处理显著大于 M20 处理, M30 与 M40 处理间差异不显著。玉米子粒产量和品质与抽雄期、成熟期土壤团聚体  $R_{0.25}$  呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 PAD、D 值呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。因此, 玉米生产中, 利用有机肥等氮替代化肥培肥土壤, 需兼顾玉米产量和品质, 30% 为适宜的有机肥等氮替代化肥比例。

**关键词** 有机肥等氮替代化肥; 土壤团聚体; 玉米; 产量; 品质

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



国内外学者把土壤团聚体水稳性作为表征土壤物理特性的重要指标, 认为土壤团聚体直接影响土壤肥力和农作物的生长<sup>[1-2]</sup>。施用有机肥具有显著改善土壤团聚体状况、促进土壤团聚体形成和提高土壤团聚体稳定性等作用<sup>[3-4]</sup>。团聚体形成过程中, 能有效地利用有机肥中的长链小分子胶结矿物颗粒, 促进土壤颗粒的团聚作用, 提高团聚体的稳定性<sup>[5]</sup>。土壤生产力、作物产量和品质随着有机物的施加存在一定的上升趋势<sup>[6-8]</sup>。作物产量是单施有机肥最低, 单施化肥次之, 而有有机肥与无机肥配合施用产量最高<sup>[9-10]</sup>。许多学者针对不同区域开展有机肥替代化肥的研究, 利用湖南菜园土开展不同种类有机肥替代化肥试验, 以沼

渣沼液氮替代 20% 化肥氮和猪粪堆肥氮替代 30% 化肥氮, 春玉米产量和品质最优<sup>[11]</sup>。华北平原潮土, 商品有机肥氮替代 11.3% 化肥氮能保证华北平原小麦—玉米轮作体系稳产、高产<sup>[12]</sup>。吉林黑土地地区, 在适宜氮用量为  $165\text{kg}/\text{hm}^2$  时, 以农家肥氮替代 70% 或秸秆氮替代 30% 化肥氮素, 既减少化肥氮投入, 又增加了土壤供氮能力<sup>[13]</sup>。西南紫色土地区, 有机肥氮替代 50% 化肥氮显著提高了玉米经济产量和生物产量<sup>[14]</sup>。山东棕壤地区, 冬小麦—夏玉米轮作利用有机肥替代 25% 常规化肥用量, 比单施化肥处理获得更高的产量和品质<sup>[15]</sup>。因此, 有机肥等氮替代化肥可以提高玉米产量和品质, 但不同区域土壤等氮替代比例不一致, 并且有机肥等氮配施或部分替代化肥是否可以通过提高红壤玉米种植区土壤团聚体的稳定性, 进而提高玉米的产量和品质目前尚不清楚。本研究通过云南红壤有机肥等氮替代化肥, 与常规施肥相比, 分析玉米不同生育时期土壤团聚体的变化,

作者简介: 周芸, 硕士研究生, 主要从事土壤培肥方面的研究

范茂攀为通信作者, 副教授, 主要从事土壤培肥与水土保持方面的研究

基金项目: 国家自然科学基金 (41661063); 云南省重点研发专项课题 (2018BB015-04); 云南省农业基础研究联合专项 (2017FG001-045)

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-06-11

探讨有机肥等氮替代比例对土壤团聚体状况、玉米产量和品质的影响,提出针对区域红壤的有机肥等氮部分替代化肥合适比例,为区域土壤培肥和减肥增效提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5 月在云南省昆明市寻甸县大河桥云南农业大学实践教学基地(25°31'07" N, 103°16'41" E)进行,海拔 1 860m,年平均气温 15.80℃,年均降水量 900~1 000mm,降水主要集中在 5~9 月份,属亚热带季风气候。土壤类型为红壤,前茬作物为蚕豆(*Vicia faba* L.),试验前取 0~20cm 耕层土样,测定其养分含量:有机质 28.57g/kg,全氮 109.45mg/kg,碱解氮 77.10mg/kg,有效磷 14.25mg/kg,速效钾 129.37mg/kg, pH 为 6.84。

### 1.2 试验设计

选择玉米(*Zea mays* L.)品种“云瑞 88”为材料。有机肥为猪粪堆腐肥,为减少养分含量差异,施用前过 2mm 筛孔,含水率约 38.00%,其养分含量为全氮(N 3.33%)、全磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.74%)和全钾(K<sub>2</sub>O 1.4%);化肥为普通尿素(N 46.3%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16.0%)和硫酸钾(K<sub>2</sub>O 51.0%)。

试验设置 6 个处理:对照(CK,不施肥),M0(单施 NPK 肥),M10(有机肥等氮替代化肥 10%),M20(有机肥等氮替代化肥 20%),M30(有机肥等氮替代化肥 30%),M40(有机肥等氮替代化肥 40%)。M0 处理肥料常规施用量为 N 240kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 75kg/hm<sup>2</sup>,有机肥按照等氮量进行替代,并扣除有机肥带入的磷钾含量,M10 为 1 897kg/hm<sup>2</sup>,M20 为 3 793kg/hm<sup>2</sup>,M30 为 5 890kg/hm<sup>2</sup>,M40 为 7 586kg/hm<sup>2</sup>。4 次重复,24 个小区,每个小区面积为 28m<sup>2</sup>(4m×7m),试验小区采用随机区组排列。玉米种植行距为 60cm,株距为 25cm,开沟播种,播深 4~5cm。氮肥以总氮用量的 40% 作基肥,60% 作追肥,有机肥、磷钾肥作基肥一次性施入,追肥分别在玉米的拔节期(总 N 35%)和大喇叭口期(总 N 25%)施用。按常规田间管理进行除草、浇水和病虫害防治。

### 1.3 样品采集

采集玉米不同生育期(拔节期、大喇叭口期、抽雄期、成熟期)0~20cm 耕层土壤样品,每个小区利用对角线法采集 5 个样点混合为一个代表土

样,带回实验室风干。在成熟期对玉米进行实地测产,每个小区随机选取 10 株,用于测定子粒蛋白质、淀粉和可溶性糖含量。

### 1.4 样品分析

土壤稳定性团聚体制备参考王婷等<sup>[16]</sup>的研究,先在干筛仪(孔径依次为 0.25、0.5、1、2、5mm)进行干筛,之后湿筛,计算各粒级水稳性团聚体质量。参考何照范<sup>[17]</sup>的方法测定玉米子粒品质,采用双缩脲法测定蛋白质含量;采用蒽酮-硫酸比色法测定淀粉和可溶性糖含量。

### 1.5 数据处理与分析

$$>0.25\text{mm 水稳性团聚体含量}(R_{0.25}): R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

式中, $R_{0.25}$ 为粒径>0.25mm 水稳性团聚体含量(%), $M_{r>0.25}$ 为粒径>0.25mm 水稳性团聚体质量(g), $M_T$ 为水稳性团聚体总质量(g)。

$$\text{平均质量直径(mean weight diameter, MWD)}^{[18]}: MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (2)$$

式中, $\bar{x}_i$ 为各粒级水稳性团聚体平均直径(mm), $w_i$ 为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%)。

$$\text{几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)}^{[18]}: GMD = \exp[(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i)/(\sum_{i=1}^n w_i)] \quad (3)$$

式中, $\bar{x}_i$ 为各粒级水稳性团聚体平均直径(mm), $w_i$ 为各粒级水稳性团聚体质量百分数(%)。

$$\text{结构体破坏率(portion of aggregate destruction, PAD)}^{[19]}: PAD = \frac{W_{d0.25} - W_{w0.25}}{W_{d0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, $W_{d0.25}$ 为>0.25mm 机械稳定性团聚体质量(g), $W_{w0.25}$ 为>0.25mm 水稳性团聚体质量(g)。

分形维数(fractal dimension, D)的计算采用杨培岭等<sup>[20]</sup>推导的公式:

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left( \frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (5)$$

对上式左右两边取对数,得 $\lg[M(r < \bar{R}_i)/M_T] = (3-D)\lg[\bar{R}_i/R_{\max}]$ ,分别以 $\lg[M(r < \bar{R}_i)/M_T]$ 为纵坐标, $\lg[\bar{R}_i/R_{\max}]$ 为横坐标作图,3-D 即为此试验直线的斜率,从而求 D 值。式中, $\bar{R}_i$ 为某级水稳性团聚体平均直径(mm), $R_{\max}$ 为水稳性团聚体最大粒径(mm), $M(r < \bar{R}_i)$ 为粒径小于 $\bar{R}_i$ 的水稳性团聚体质量(g), $M_T$ 为水稳性团聚体总质量(g)。

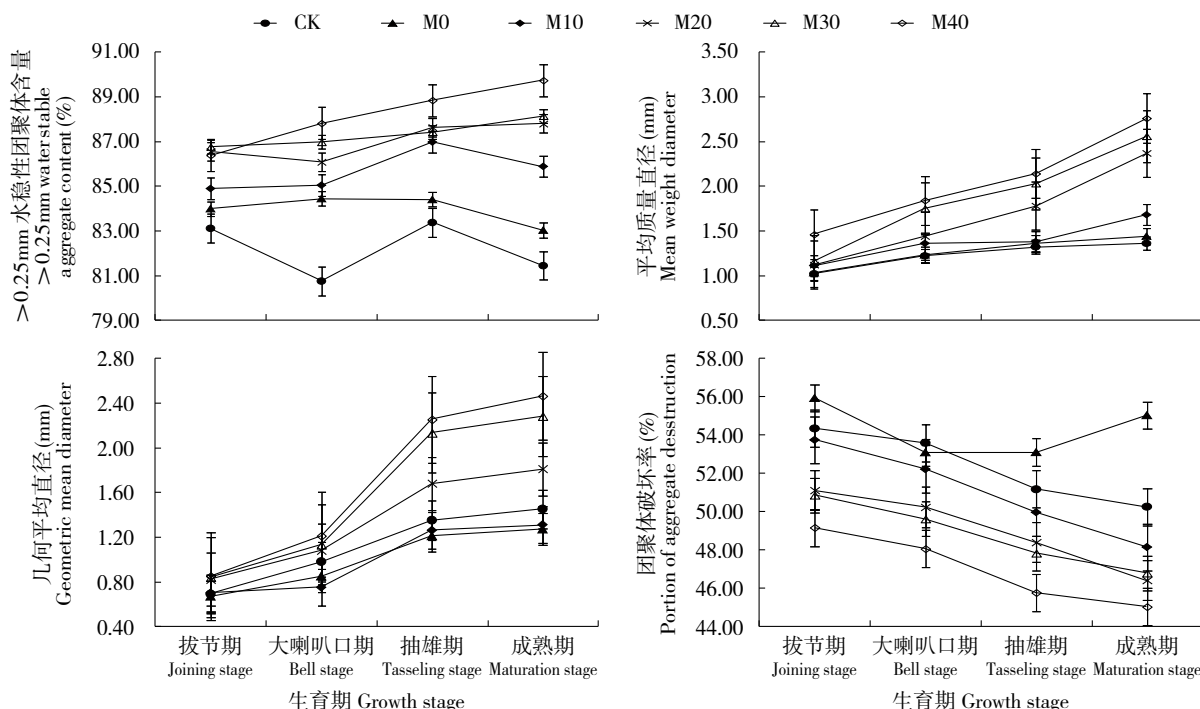
采用 Microsoft Excel 2007 和 SAS 8.1 软件进行试验数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对土壤团聚体稳定性的影响

由图 1 可知, 与单施化肥相比 (M0), 随着有

机肥等氮替代化肥比例的提高, 玉米整个生育期 MWD、GWD 不断增加, PAD 不断降低。在玉米 4 个生育期, 不同处理在各时期的土壤水稳性团聚体  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 由高到低均表现为: M40>



CK、M0、M10、M20、M30 和 M40 分别代表不施肥处理、单施化肥处理、有机肥氮替代 10% 化肥氮处理、有机肥氮替代 20% 化肥氮处理、有机肥氮替代 30% 化肥氮处理、有机肥氮替代 40% 化肥氮处理; 下同  
CK, M0, M10, M20, M30 and M40 stand for no fertilization treatment, single application of chemical fertilizer, nitrogen of organic manure replacing 10% chemical nitrogenous fertilizer, nitrogen of organic manure replacing 20% chemical nitrogenous fertilizer, nitrogen of organic manure replacing 30% chemical nitrogenous fertilizer, nitrogen of organic manure replacing 40% chemical nitrogenous fertilizer; the same below

图 1 有机肥不同等氮替代化肥比例玉米生育时期土壤水稳性团聚体分析  
Fig.1 Analysis of soil water stability aggregates in growth period of maize with different equal nitrogen replacement of chemical fertilizer for organic fertilizer

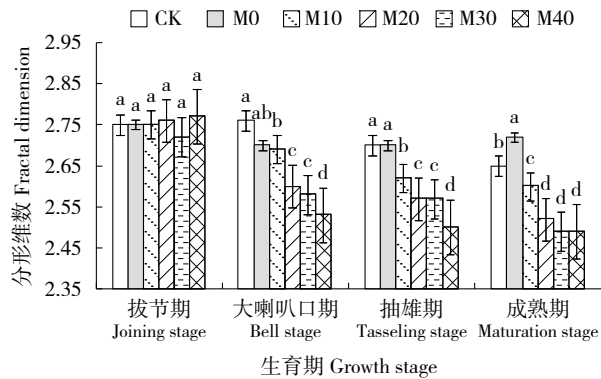
M30>M20>M10>M0。

有机肥等氮替代化肥处理的土壤水稳性团聚体  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD, M10 玉米各生育期与 M0 处理差异不明显。M40、M30、M20 处理的土壤水稳性团聚体  $R_{0.25}$ , 抽雄期较 M0 处理分别提高了 3.58%、3.83% 和 5.26%, 成熟期较 M0 处理分别提高了 6.15%、5.72% 和 8.07%。随着生育期的推移, 有机肥等氮替代化肥的比例不断增大, 土壤水稳性团聚体  $R_{0.25}$  不断增加。与 M0 处理相比, M20、M30、M40 处理的 MWD 在玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期和成熟期分别提高了 8.74%~41.74%、17.07%~61.00%、30.08%~57.35% 和 77.78%~84.72%; GMD 在玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期和成熟期分别提高了 22.38%~26.86%、27.06%~

42.35%、38.84%~65.95% 和 54.00%~83.70%。充分表明随着有机肥等氮替代化肥比例的增加, 团聚体 MWD 和 GMD 不断增加。与 M0 处理相比, M20、M30、M40 处理的 PAD 在玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期和成熟期分别降低了 8.61%~11.92%、5.39%~9.49%、8.87%~13.82% 和 15.00%~18.17%, 随着有机肥等氮替代化肥比例的增加, 团聚体破坏率不断降低, 稳定性增强。

如图 2 所示, 随着玉米生育期由拔节期至成熟期的推移, 土壤分形维数 D 逐渐减小。拔节期, 与 M0 处理相比, 有机肥等氮替代化肥处理在拔节期土壤 D 值差异不显著, 大喇叭口期、抽雄期、成熟期有机肥等氮替代化肥 20%~40%, 土壤 D 值显著降低, 从高到低表现为 M40<M30<M20<

M10<M0<CK。大喇叭口期 M20、M30、M40 处理土壤 D 值与 M0 处理相比显著降低了 4.44%~6.30%，抽雄期显著降低了 4.80%~7.40%；成熟期显著降低 7.14%~8.46%；成熟期 M40、M30、M20 处理土壤水稳性团聚体 D 值差异不显著。



不同小写字母表示不同处理间的差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同  
Different letters in the same column mean significant difference ( $P < 0.05$ ) between different treatments, the same below

图2 有机肥不同等氮替代化肥比例玉米生育时期团聚体的分形维数 (D)

Fig.2 Fractal dimension of aggregates of during the growth period of maize with different equal nitrogen replacement of chemical fertilizer for organic fertilizers (D)

## 2.2 不同施肥处理对玉米产量和品质的影响

由图 3 可知，M30 处理的产量显著高于 CK、

M0、M10、M20 处理，M0、M10 和 M20 处理间差异不显著，M30 与 M40 处理差异不显著。与 M0 处理相比，M30、M40 处理产量分别显著提高了 15.45%、9.62% ( $P < 0.05$ )。因此，从产量来看，M30 处理为适宜的有机肥等氮替代处理。

由图 3 可知，与单施化肥 M0 处理相比，有机肥等氮替代化肥 10% (M0) 处理对玉米产量的影响差异不显著，M20、M30 和 M40 处理较 CK、M0、M10 处理显著提高了玉米子粒蛋白质、淀粉及可溶性糖含量。M30 处理玉米子粒蛋白质含量最高，较 M0 处理显著提高了 25.03%，M30 与 M20 处理差异不显著，但 M30 和 M20 处理显著高于 M40 处理。因此，从增加玉米子粒蛋白质角度考虑，M30 处理是适宜的有机肥等氮替代比例。M40 处理玉米子粒淀粉含量较 M30、M20、M10、M0 处理分别显著增加了 19.65%、45.86%、102.96%、114.06%，即随着有机肥等氮替代比例的增加，子粒淀粉含量不断增加。玉米子粒可溶性糖含量中 M30 和 M40 处理差异不显著，M30 与 M20 处理差异不显著，M40 处理显著高于 M20 处理，M30 处理相比于 M0 处理可溶性糖含量显著提高了 44.59%。

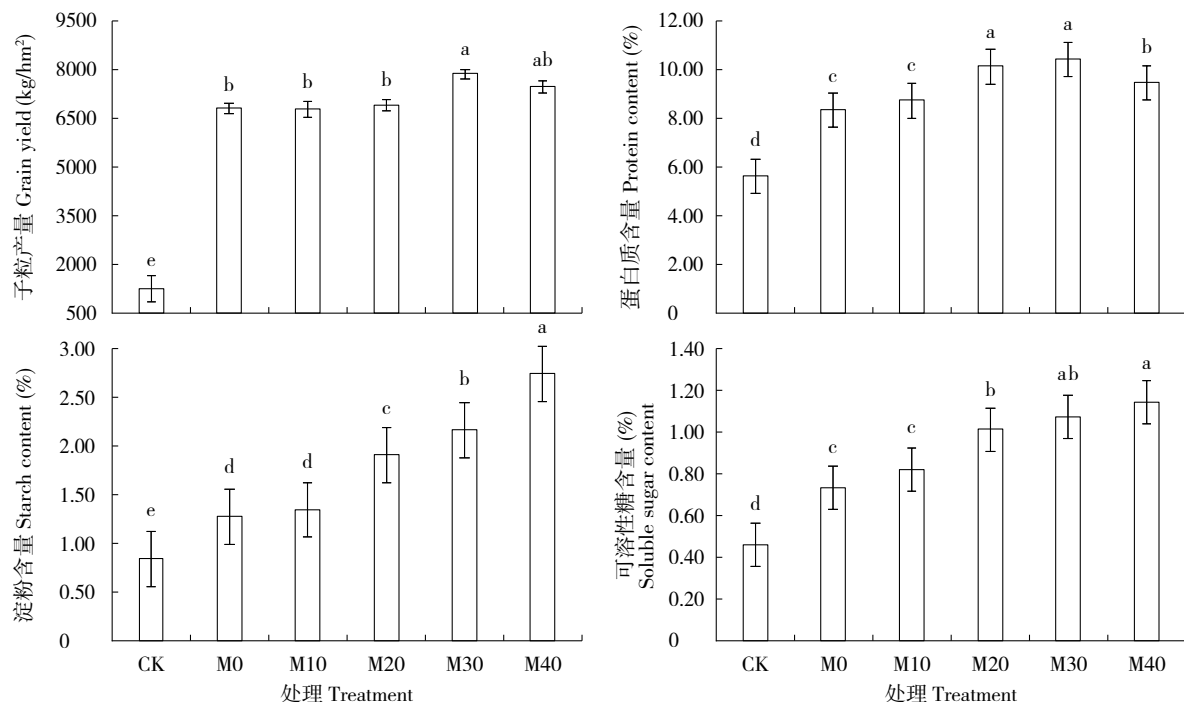


图3 有机肥不同等氮替代化肥比例玉米子粒产量和品质的影响

Fig.3 Effects of different equal nitrogen replacement of chemical fertilizer for organic fertilizer on maize grain yield and quality

综合子粒蛋白质、淀粉和可溶性糖含量，提高玉米品质的有机肥等氮替代化肥比例为 30% (M30)。

2.3 土壤团聚体稳定性与玉米子粒产量品质的相关分析

由表 1 可知，玉米拔节期，玉米子粒产量、蛋白质、淀粉及可溶性糖含量与土壤团聚体指标中的 GMD、PAD、D 值的相关性不显著。大喇叭口期，玉米子粒产量、蛋白质、淀粉及可溶性

糖含量与土壤团聚体 GMD 差异不显著。拔节期， $R_{0.25}$  与子粒产量和蛋白质含量呈极显著正相关，大喇叭口期，D 值与淀粉和可溶性糖含量呈极显著负相关。玉米抽雄期、成熟期，团聚体 MWD、GMD 与子粒产量、淀粉及可溶性糖含量呈显著或极显著正相关。玉米子粒产量和品质受抽雄期、成熟期团聚体稳定性影响较显著。抽雄期和成熟期中，子粒产量、蛋白质、淀粉及可溶性糖含量与水稳性团聚体  $R_{0.25}$  呈极显著正相关，与 PAD、

表 1 玉米不同生育期团聚体稳定性指数与子粒产量品质的相关性  
Table 1 Correlation between stability index of agglomerate and grain yield and quality in different growth stages of maize

生育时期 Growth stage	稳定性指数 Stability index	子粒产量 Grain yield	蛋白质含量 Protein content	淀粉含量 Starch content	可溶性糖含量 Soluble sugar content
拔节期 Jointing stage	$R_{0.25}$	0.527**	0.569**	0.042	0.224
	MWD	0.265	0.339	0.706**	0.610**
	GMD	0.113	0.184	0.294	0.261
	PAD	-0.212	-0.201	-0.043	-0.032
	D	-0.294	-0.259	0.081	-0.133
大喇叭口期 Bell stage	$R_{0.25}$	0.773**	0.870**	0.574**	0.754**
	MWD	0.406*	0.085	0.063	0.085
	GMD	0.161	0.045	-0.096	0.052
	PAD	-0.027	-0.279	-0.537**	-0.406*
	D	-0.404*	-0.463*	-0.848**	-0.744**
抽雄期 Tasseling stage	$R_{0.25}$	0.761**	0.609**	0.638**	0.809**
	MWD	0.620**	0.333	0.406*	0.490*
	GMD	0.731**	0.440*	0.455*	0.508*
	PAD	-0.672**	-0.718**	-0.687**	-0.779**
	D	-0.697**	-0.757**	-0.789**	-0.657**
成熟期 Maturation stage	$R_{0.25}$	0.806**	0.783**	0.599**	0.738**
	MWD	0.411*	0.492*	0.468*	0.500*
	GMD	0.509**	0.407*	0.573**	0.461*
	PAD	-0.606**	-0.552**	-0.627**	-0.545**
	D	-0.825**	-0.832**	-0.788**	-0.806**

注：“\*”表示在 0.05 水平显著相关；“\*\*”表示在 0.01 水平极显著相关  
Note: “\*” means significant correlated at 0.05 level; “\*\*” means highly significant correlated at 0.01 level

D 值均呈极显著负相关。

3 讨论

土壤中水稳性团聚体 (>0.25mm) 的量是土壤结构的关键指标，与土壤肥力密切相关，其数量越多，土壤肥力越高<sup>[21]</sup>。土壤团聚体的 MWD 和 GMD 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标，其值越大表示团聚体稳定性越强<sup>[22-23]</sup>。团聚体破坏率能直观表现土壤团聚体的稳定性，它解释了土

壤团聚体受水力机械破坏而导致分散程度的大小。利用分形维数探究土壤团聚体大小分布，能更好地揭示土壤团聚体的分形特征<sup>[24]</sup>。因此，本研究选取水稳性团聚体  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、PAD、D 值来反映有机肥等氮部分替代化肥，团聚体大小分布状况和土壤团聚体的稳定性。本研究中，随着有机肥等氮替代化肥比例的增加，玉米不同生育期土壤水稳性团聚体  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 不断增加，PAD、D 值不断降低，土壤团聚体稳定性显

著高于单施化肥处理,说明有机肥等氮替代化肥在改善土壤结构方面有很大潜力。原因可能是有机肥中含有丰富的多糖、腐殖质等有机物质,通过功能基、范德华力、氢键等作用机制可改变土壤分散无结构和粘结大块结构的现象,促进团粒的形成。Alagoz 等<sup>[25]</sup>和 Soltani 等<sup>[26]</sup>的研究也表明有机肥配施不仅可以减少氮盈余,同时有机肥富含的氨基酸和一些生理活性物质能够促进根系伸长,增加根系分泌物对团聚体的胶结作用,其胶结作用随有机肥配施比例的增加而增强,土壤肥力随之提高。

通过研究发现,有机肥等氮替代化肥土壤团聚体稳定性特征值  $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 由低到高表现为拔节期 < 大喇叭口期 < 抽雄期 < 成熟期, PAD、D 值由高到低表现为拔节期 > 大喇叭口期 > 抽雄期 > 成熟期,土壤团聚体稳定性特征值增加和降低幅度最大的时期均为玉米抽雄期。原因可能是随玉米生育期的推移,玉米根系生物量不断增加,根系分泌物含量随之增多,根系分泌物产生的有机酸和多糖类物质能够增强土粒之间的团聚化作用<sup>[16]</sup>,同时有机酸类物质还能促进对外源有机碳的矿化,使土壤中有机质含量显著增加,改善土壤的团粒结构和孔性。在作物生长旺盛的抽雄期,玉米根系较发达,根系分泌物含量较高,另外研究表明猪粪有机肥的矿化速率随时间的推移而增加<sup>[27]</sup>,有机质含量显著增加。两者双重作用使团聚体稳定性显著提高。与单施化肥相比,随着有机肥等氮替代化肥比例的增加,土壤团聚体稳定性增强,玉米成熟期, M20、M30、M40 处理较 M0 处理土壤水稳性团聚体  $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 均提高, PAD 和 D 值降低。崔江辉等<sup>[28]</sup>在山西中部小麦—高粱轮作系统中的研究表明,化肥减量配施商品有机肥 25%~50%,水稳性团聚体 MWD 和 GMD 显著提高, PAD、D 值显著降低。郑学博等<sup>[29]</sup>在江西省旱地红壤的研究也表明化肥减量沼液全氮还田 30%~45%,土壤水稳性团聚体含量和团聚体稳定性显著提高。荣勤雷<sup>[30]</sup>在河北省设施菜田研究表明配施 25% 猪粪对土壤团聚体的影响不显著,配施比例达 50% 才能显著提高水稳性团聚体 MWD 和 GMD。进一步说明,有机肥等氮替代化肥的效果受区域土壤类型及气候等因素的影响,不同地区有机肥提高土壤团聚体稳

定性化肥最佳替代比例不同,需因地制宜。综合而言,化肥减施在一定程度上可以增加土壤  $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD,降低 PAD 和 D 值,增强团聚体的稳定性。但有机肥等氮替代化肥对土壤其他理化性质的影响需进行长期定点试验深入研究。

有机无机肥配施可有效减少化肥氮的损失,为作物生长提供氮素营养,提高作物产量和品质<sup>[31-32]</sup>。研究发现,有机肥等氮替代化肥达 30%、40% (M30、M40) 玉米子粒产量显著提高,表现为 M30 > M40,说明玉米产量不会始终随有机肥等氮替代化肥比例增加而增加。目前,国内在有机肥等氮替代化肥对玉米品质的影响研究并不是很多,研究结果存在一定的差异,部分研究表明通过调节肥料施用,一种品质指标上升同时也会引起其他品质指标的失衡,许多地方值得深入探讨。周江明<sup>[33]</sup>认为有机氮在 20%~40% 可获得较好的稻米品质,有机氮比例过高则稻米易碎、蛋白质含量下降。李燕青等<sup>[34]</sup>研究表明,潮土加倍配施猪粪小麦品质随配施比例的增加而升高,配施比例可增加至 75%。卢浩宇等<sup>[35]</sup>也发现有机肥配施能提高紫米稻的糙米率和精米率,配施比例可达 100%,但直链淀粉含量会降低。通过研究发现,山区红壤 M40 处理玉米子粒淀粉可溶性糖和蛋白质增幅相比于 M30 处理显著增加。可见玉米各品质指标对有机肥的响应不具有 consistency,随有机肥等氮替代或配施比例的增加玉米子粒淀粉和可溶性糖含量有一定的增加趋势,蛋白质含量不始终随有机肥等氮替代比例的增加而增加。影响玉米高产优质的因素还有许多,玉米高产优质施肥理论与技术体系还需进一步研究,建议从产量形成的营养物质积累与分配,氮、磷、钾合理配比以及养分的源库关系等同有机肥的合理配施相联系。

相关性分析表明,玉米子粒产量、蛋白质、淀粉、可溶性糖含量与玉米抽雄期、成熟期土壤水稳性团聚体 MWD、GWD 呈显著正相关,与  $R_{0.25}$  呈极显著正相关,与 PAD、D 值呈极显著负相关,表明随时间的推移,有机肥等氮替代化肥土壤结构逐渐改善,且在抽雄期和成熟期达到整个生育期的较高水平,符合有机肥改良土壤的一般规律。良好的土壤结构对水肥气热的调节,更有利于作物生长发育,有机肥等氮部分替代化肥可能通过改善玉米不同生育时期土壤结构,调控

土壤水肥气热, 协调土壤养分供需能力, 进一步提高了玉米的产量和品质。

## 4 结论

随着有机肥等氮替代化肥比例的增加, 玉米生育期土壤水稳定性团聚体  $R_{0.25}$ 、MWD、GWD 不断升高, PAD、D 值不断降低。与单施化肥相比, M30 和 M40 土壤团聚体的稳定性显著提高, 玉米子粒淀粉和可溶性糖含量随等氮替代比例的升高而显著升高, 玉米子粒产量、蛋白质含量不始终随有机肥等氮替代比例的增加而增加, 表现为  $M30 > M40$ 。因此, 山区红壤利用有机肥等氮替代化肥减少化肥投入量进行土壤培肥时, 应兼顾农作物的产量和品质。本研究中, 有机肥氮替代化肥氮 30% 为适宜的等氮替代比例。

### 参考文献

- [1]Chen Y, Zhang X D, He H B, et al. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization. *Journal of Soil Sediment*, 2010, 10(1): 1018–1026.
- [2]赵金星, 周伟, 战英策, 等. 土壤改良剂对盐化草甸土壤物理性质及水稻产量的影响. *作物杂志*, 2018(6): 138–143.
- [3]Zeki A, Erdem Y. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 419–424.
- [4]Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124(1): 170–177.
- [5]Karami A, Homae M, Afzalnia S, et al. Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148(1): 22–28.
- [6]黄山, 潘晓华, 黄欠如, 等. 长期不同施肥对南方丘陵红壤旱地生产力及土壤结构的影响. *江西农业大学学报*, 2012, 34(2): 403–408.
- [8]徐苗, 何文寿, 马琨. 化肥有机肥配施对油菜产量及品质的影响. *作物杂志*, 2017(5): 129–135.
- [9]刘艳, 李波, 孙文涛, 等. 生物有机肥对盐碱地春玉米生理特性及产量的影响. *作物杂志*, 2017(2): 98–103.
- [10]马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007(2): 236–241.
- [11]黄涛, 荣湘民, 刘强, 等. 不同施肥模式对春玉米产量、品质与氮肥利用及玉米地氮流失的影响. *土壤*, 2010, 42(6): 915–919.
- [12]温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2136–2142.
- [13]高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 318–325.
- [14]谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥提高玉米产量和氮素吸收利用效率. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3934–3943.
- [15]李占, 丁娜, 郭立月, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对冬小麦—夏玉米生长、产量和品质的影响. *山东农业科学*, 2013, 45(7): 71–77, 82.
- [16]王婷, 李永梅, 王自林, 等. 间作对玉米根系分泌物及团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 185–190.
- [17]何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术. 北京: 农业出版社, 1985: 137–140, 290–294.
- [18]Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical & Mineralogical Methods*, 1986, 9(2): 425–442.
- [19]陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 211–216.
- [20]杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896–1899.
- [21]Six J, Elliot E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter. II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 1042–1049.
- [22]Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227–234.
- [23]Meng Q F, Sun Y T, Zhao J, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1041–1049.
- [24]张保华, 刘子亭, 何毓蓉, 等. 应用分形维数研究土壤团聚体与低吸力段持水性的关系. *土壤通报*, 2006, 37(5): 857–860.
- [25]Alagöz Z, Yilmaz E. Effect of different sources of organic matter soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(3): 419–424.
- [26]Soltani S, Khoshgofarmanesh A H, Afyuni M. The effect of preceding crop on wheat grain zinc concentration and its relationship to total amino acids and dissolved organic carbon in rhizosphere soil solution. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 50(2): 239–247.
- [27]周博, 高佳佳, 周建斌. 不同种类有机肥碳、氮矿化特性研究. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 366–373.
- [28]崔江辉, 崔福柱, 薛建福, 等. 化肥减施对小麦—高粱系统土壤团聚体分布及其稳定性的影响. *作物杂志*, 2018(1): 126–132.
- [29]郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响. *中国农业科学*, 2015, 48(16): 3201–3210.
- [30]荣勤雷. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤团聚体微生物特性的影响. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [31]郑亚萍, 吴兰荣, 吴正锋, 等. 不同施肥处理对花生产量、品质及衰老的影响. *作物杂志*, 2011(2): 45–48.
- [32]吕彦彬, 金亚征. 生物有机肥对马铃薯产量及淀粉含量的影响. *作物杂志*, 2009(1): 40–41.
- [33]周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 234–240.
- [34]李燕青, 林治安, 温延臣, 等. 不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1513–1522.
- [35]卢浩宇, 文浩, 易镇邪, 等. 施氮量与有机无机肥配施比例对紫米稻产量形成与米质的影响. *作物杂志*, 2017(6): 147–153.



# Effects of Nitrogen in Organic Manure Replacing Chemical Nitrogenous Fertilizer on Aggregates of Red Soil, Maize Yield and Quality

Zhou Yun, Li Yongmei, Fan Maopan, Wang Zilin,  
Xu Zhi, Zhang Dan, Zhao Jixia

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China)

**Abstract** In order to study the effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer with equal nitrogen on structure and maize yield and quality in soil, set up six treatments of 10% (M10), 20% (M20), 30% (M30), 40% (M40) ratio of organic fertilizer replacing chemical fertilizer, with control application of chemical fertilizer (M0) and no application of fertilizer (CK). The dynamic change of soil aggregates in different growth stages of maize. The results showed that with the increase of the proportion of organic fertilizer,  $>0.25\text{mm}$  soil water stability aggregates ( $R_{0.25}$ ), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GWD) increased continuously but the portion of aggregate destruction (PAD), fractal dimension (D) decreased continuously during the growth period of maize. Compared with M0 treatment, grain yields of M30 and M40 treatments increased significantly, which was manifested as  $M30 > M40$ ; M20, protein contents of M30 and M40 treatment significantly increased by 13.29%-25.03%, starch content increased by 39.84%-114.06%, and the soluble sugar content increased by 36.49%-54.05%. The protein contents of M30 and M20 was significantly greater than that of M40, and the difference between M30 and M40 was not significant. The starch content was  $M40 > M30 > M20$ , with significant differences. The soluble sugar contents of M40 and M30 was significantly higher than that of M20, and the difference between M30 and M40 was not significant. Maize grain yield and quality were positively correlated with  $R_{0.25}$  ( $P < 0.01$ ) and negatively correlated with PAD and D value ( $P < 0.01$ ). Therefore, the equal nitrogen in the organic fertilizer replacing chemical fertilizer for fertilizing soil should take into account for the yield and quality of maize, and 30% is the appropriate ratio.

**Key words** Organic fertilizer replacing chemical fertilizer with equal nitrogen; Soil aggregates; Maize; Yield; Quality