

长期秸秆替代部分化学氮肥对水稻产量和土壤磷组分的影响^①

肖入升, 蒋国亮, 韩永亮, 荣湘民*

(湖南农业大学资源学院, 长沙 410128)

摘要: 依托长期定位试验, 探讨了长期秸秆替代部分化学氮肥对水稻产量和土壤磷素累积的影响以及土壤化学性质与磷组分的关系。结果表明: 与单施化肥相比, 秸秆替代氮肥 1/3 和 2/3 处理通过增加水稻结实率、每穗实粒数和有效穗数来提升产量, 水稻地上部总产量分别显著增加了 17.8% 和 17.9%; 同时, 水稻不同生育期的土壤全氮、碱解氮、速效钾和有机质含量在秸秆替代氮肥处理下均显著增加, 但全磷含量分别降低了 14.3% ~ 35.2% 和 21.1% ~ 37.65%, 有效磷含量分别降低了 24.5% ~ 46.5% 和 42.6% ~ 60.1%。在土壤磷组分方面, 秸秆替代氮肥主要影响无机磷组分, 与单施化肥相比, 秸秆替代氮肥 1/3 和 2/3 处理铝磷含量分别降低了 17.6% ~ 52.4% 和 35.1% ~ 57.8%, 铁磷含量分别降低了 14.1% ~ 26.7% 和 29.8% ~ 42.5%, 钙磷含量分别降低了 21.2% ~ 55.2% 和 46.5% ~ 66.5%。相关分析表明, 除全钾和 pH 外, 其他土壤化学性质指标均与铝磷、铁磷和钙磷有显著相关性, 秸秆替代氮肥通过影响土壤化学性质来调控不同磷形态之间的转化。

关键词: 秸秆替代氮肥; 水稻; 产量; 土壤化学性质; 磷组分

中图分类号: S511; S153.6 文献标志码: A

Effect of Long-term Straw Substituted for Partial Chemical Nitrogen Fertilizer on Rice Yield and Soil Phosphorus Components

XIAO Rusheng, JIANG Guoliang, HAN Yongliang, RONG Xiangmin*

(College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: This study relied on a long-term positioning experiment to investigate the effects of long-term straw replacement of partial chemical nitrogen fertilizers on rice yield and soil phosphorus accumulation as well as the relationship between soil chemical properties and phosphorus components. The results showed that compared with chemical fertilizers alone, straw replacement of nitrogen fertilizers for 1/3 and 2/3 enhanced rice yield by increasing the fruiting rate, the number of solid grains per spike and the number of effective spikes of rice, and the total aboveground biomass of rice increased significantly by 17.8% and 17.9%, respectively. Meanwhile, straw replacement significantly increased the contents of soil total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available potassium and organic matter at different growth periods of rice, while reduced total phosphorus content by 14.3%–35.2% and 21.1%–37.65%, and available phosphorus content by 24.5%–46.5% and 42.6%–60.1% under straw replacement of nitrogen fertilizers for 1/3 and 2/3, respectively. In terms of soil phosphorus components, straw replacement mainly affected inorganic phosphorus components, and compared with chemical fertilizers alone, aluminum phosphorus (Al-P) content decreased by 17.6%–52.4% and 35.1%–57.8%, iron phosphorus (Fe-P) content decreased by 14.1%–26.7% and 29.8%–42.5%, and calcium phosphorus (Ca-P) content decreased by 21.2%–55.2% and 46.5%–66.5% under straw replacement of nitrogen fertilizers for 1/3 and 2/3, respectively. Except soil total potassium and pH, the other soil chemical properties were significantly correlated with Al-P, Fe-P and Ca-P, which indicates straw replacement of nitrogen fertilizer regulates the transformation between different phosphorus forms by affecting soil chemical properties.

Key words: Straw substituted for nitrogen fertilizer; Rice; Yield; Soil chemical properties; Phosphorus fraction

①基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U19A2050)资助。

* 通信作者(rongxm2005@126.com)

作者简介: 肖入升(1999—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分资源管理研究。E-mail: 864505651@qq.com

水稻是三大粮食作物之一,被认为是全球一半以上人口的主要食物来源^[1]。我国作为水稻种植大国,水稻产量占世界水稻总产量的28.1%,占全球水稻收获面积的18.8%^[2]。随着人口的日益增长,人们对粮食的需求也逐渐增加。研究预测,到2030年中国需要增加约20%的水稻产量才能满足人口增长的需求^[3]。

磷素是水稻生长发育过程中必需的营养元素,对于水稻增产发挥着重要作用。土壤中的磷以有机磷和无机磷的形式存在^[4]。然而,土壤中的磷大部分是以无机磷形式固定的,且磷在土壤中会通过与Al³⁺、Fe³⁺、Ca²⁺等金属离子的沉淀和吸附形成多种磷化合物,这严重限制了磷的有效性^[5]。土壤磷库组成是评价土壤供磷能力的重要指标,不同形态磷组分的变化也影响着土壤磷有效性^[6]。

出于对土壤养分速效性的追求,农户普遍习惯施用化学肥料。然而,磷作为一种相对稳定的元素,在过量施用化肥的情况下,磷素投入远超作物需求,导致磷素在土壤中的逐步累积和固定^[7]。这不但浪费大量的肥料资源,还限制土壤磷素的有效性,且在稻田中往往还会发生径流、淋溶和渗漏等损失,引发环境风险^[8]。因此,为了保障水稻增产增收和土壤磷素的有效性,应该考虑更加科学合理的施肥方式。

秸秆资源化利用是我国一直强调的一项政策,在党的二十大上仍然提出要扎实推进秸秆科学还田。秸秆是一种关键的有机肥资源,秸秆还田能够减少对化肥的依赖,促进养分归还以及土壤肥力和作物产量的提升^[9]。秸秆能够在一定程度上替代化肥,补偿一部分磷素,在保障磷素正常供应的基础上,减少过量施用化肥所带来的土壤磷素累积^[10-11]。

综合国内外研究报道发现,秸秆通常以氮肥或钾肥的形式投入,针对秸秆替代氮肥对不同水稻生育期土壤磷组分影响的研究较少。因此,本研究依托长期定位试验,选取单施化肥(CF)、秸秆替代1/3化学氮肥(NS)和秸秆替代2/3化学氮肥(HS)3种施肥措施,研究秸秆替代氮肥对水稻产量和土壤磷素形态变化的影响,以为水稻稳产及秸秆科学施用提供理论依据,助力农业绿色可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验地位于湖南省长沙市芙蓉区湖南农业大学校内长期定位试验基地(28°18'N, 113°08'E),属亚热带季风气候,年均气温为17.5℃,年平均日照时数为1400 h,区域内降水充足,年降水量为1400 mm。

供试土壤母质为第四纪红色黏土,土壤基本理化性质为:pH 5.70,有机质13.29 g/kg,全氮1.32 g/kg,全磷0.63 g/kg。供试秸秆为玉米秸秆,其碳、氮、磷、钾含量分别为449.8、10.4、5.93、12.6 g/kg,粉碎后过10 mm筛施入土壤。供试氮肥为尿素(含N 460 g/kg),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 120 g/kg),钾肥为氯化钾(含K₂O 600 g/kg)。供试水稻品种为湘早籼15。

1.2 试验设计

试验共设置3个处理:单施化肥(CF)、秸秆替代1/3氮肥(NS)和秸秆替代2/3氮肥(HS),每个处理设置3个重复,共9个小区,小区随机区组分布。小区面积为1.44 m²,每个小区种植35株水稻(5×7)。为防止鸟类啄食稻谷对水稻产量的影响,试验区四周采用不锈钢围网包围。每个小区之间用水泥浇筑隔开,各小区均具备独立灌溉能力,并且有完善的防渗措施,能有效避免小区之间串水、串肥的问题。为保证试验处理间施肥量的一致性,秸秆替代处理中养分不足的部分,通过补充化肥以平衡养分差异。所有处理的秸秆及化肥均在水稻移栽前一次性作为基肥施用,以确保各处理基础养分条件相同,从而提高试验结果的可比性和可靠性。试验处理及具体施肥量见表1。

表1 不同处理的施肥量(kg/hm²)
Table 1 Fertilizer application rates under different treatments

处理	秸秆	尿素	过磷酸钙	氯化钾	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CF	0	326	625	250	150	75	150
NS	4 790	218	388	149	150	75	150
HS	9 580	109	152	49	150	75	150

水稻于2023年4月26日移栽,5月17日采集分蘖期土壤样品,6月19日采集孕穗期土壤样品,7月17日采集成熟期土壤和植株样品。其中,土壤样品每小区采用五点取样法采集0~20 cm土层土壤混匀,风干后分别过0.15 mm和0.85 mm筛,用于土壤化学性质和磷组分的测定。植株样品每小区随机采取5株,用于产量计算。

1.3 测定项目与方法

土壤pH采用电极法测定(水土质量比2.5:1);有机质(SOM)采用重铬酸钾-H₂SO₄-外加热法测定;全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)采用H₂SO₄-HClO₄消解,钼锑抗比色法测定;全钾(TK)采用H₂SO₄-HClO₄消解,火焰光度法测定;碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定;有效磷(AP)采用NH₄F-HCl浸提,钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)采

用醋酸铵浸提，火焰光度法测定。

土壤无机磷组分测定采用 Chang 和 Jackson^[12]提出的分级方法：先用 0.5 mol/L 的 NH₄F 提取铝磷 (Al-P)，提取后的土样经饱和 NaCl 清洗后，用 0.1 mol/L 的 NaOH 提取铁磷 (Fe-P)，继而用 0.3 mol/L 的柠檬酸钠和连二亚硫酸钠提取闭蓄态磷 (O-P)，最后用 0.5 mol/L 的 H₂SO₄ 提取钙磷 (Ca-P)。土壤有机磷组分测定采用 Bowman 和 cole^[13]提出的分级方法：先用 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 提取活性有机磷 (LOP)，提取后的土样用饱和 NaCl 清洗后，用 0.1 mol/L 的 NaOH 提取中等稳定性有机磷 (MSOP) 和稳定性有机磷 (SOP)。MSOP 的测定需要用 HCl 将提取液 pH 调节至 1~1.5，之后再经饱和 NaCl 清洗后，用 0.1 mol/L 的 H₂SO₄ 提取中等活性有机磷 (MLOP)。提取液中各组分磷含量的测定均采用钼锑抗比色法。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2018 软件进行数据处理，用 SPSS 24.0 软件进行数据统计和分析，并用 LSD 法进行差异显著性检验 ($P<0.05$)，用 Origin 2022 软件作图。

表 3 水稻产量构成因素
Table 3 Rice yield components under different treatments

处理	株高 (cm)	穗长 (cm)	结实率 (%)	千粒重(g)	每穗实粒数	有效穗数($10^4/\text{hm}^2$)
CF	70.44 ± 10.77 a	18.23 ± 1.64 a	72.53 ± 2.63 b	18.84 ± 0.80 a	54.06 ± 0.50 b	508.8 ± 35.83 b
NS	73.72 ± 6.38 a	18.08 ± 2.10 a	76.65 ± 0.98 ab	19.09 ± 0.88 a	66.69 ± 3.59 a	499.07 ± 21.92 b
HS	73.11 ± 6.50 a	18.08 ± 1.55 a	78.43 ± 1.39 a	19.88 ± 0.67 a	60.89 ± 4.04 a	544.44 ± 25.72 a

2.2 稼秆替代氮肥对土壤化学性质的影响

不同施肥处理下水稻各生育期的土壤化学性质基本保持一致(表 4)。在水稻分蘖期，与 CF 处理相比，稼秆替代处理 NS 和 HS 的土壤 TN、AN、AK 和 SOM 含量均显著增加，其中对 AK 含量的影响最大，分别增加了 62.6% 和 122.0%；相反的是，NS 和 HS 处理使土壤 TP 含量分别显著降低了 35.2% 和 37.6%，使 AP 含量分别显著降低了 44.5% 和 56.9%，pH 在 HS 处理下显著降低了 0.17 个单位。

在水稻孕穗期，与 CF 处理相比，稼秆替代处理 NS 和 HS 对土壤 TN、AN、AK 和 SOM 含量的提升仍呈现显著效果，AN 含量在这一时期的增幅最大，分别显著增加了 33.0% 和 48.5%。而 NS 和 HS 处理使 TP 含量分别显著降低了 14.5% 和 21.1%，使 AP 含量显著降低了 24.5% 和 42.6%。

与前两个时期相比，在水稻成熟期，稼秆替代处理 NS 和 HS 对土壤 TN 和 AK 含量的影响较大，NS 和 HS 处理使 TN 含量分别显著增加了 31.3% 和 52.8%，

2 结果与分析

2.1 稼秆替代氮肥对水稻产量的影响

不同施肥处理下的水稻产量见表 2。与 CF 处理相比，稼秆替代处理 NS 和 HS 的籽粒产量分别显著增加了 22.5% 和 27.1%，地上部生物量分别显著增加了 17.8% 和 17.9%，而稼秆产量在不同处理间没有显著差异。

不同施肥处理下的水稻产量构成见表 3。与 CF 处理相比，稼秆替代处理 NS 和 HS 的结实率分别显著增加了 5.6% 和 8.1%，每穗实粒数分别显著增加了 23.4% 和 12.6%，HS 处理的有效穗数显著增加了 7%。

表 2 水稻产量 (t/hm^2 , 干重)
Table 2 Rice yield (dry weight) under different treatments

处理	籽粒产量	稼秆产量	地上部生物量
CF	5.17 ± 0.18 b	3.06 ± 0.12 a	8.23 ± 0.29 b
NS	6.34 ± 0.19 a	3.36 ± 0.07 a	9.70 ± 0.21 a
HS	6.57 ± 0.12 a	3.13 ± 0.58 a	9.71 ± 0.59 a

注：表中同列数据后小写字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

使 AK 含量分别显著增加了 87.7% 和 192.9%；TP 和 AP 含量保持与之前相同的显著降低趋势；但两个稼秆替代处理 NS 和 HS 的 pH 分别显著降低了 0.15 和 0.19 个单位。

总的来说，在不同水稻生育期，稼秆替代处理使土壤 TN、AN、AK 和 SOM 含量显著增加，使 TP 和 AP 含量以及除孕穗期以外的 pH 显著降低，其中 HS 处理的影响更大。

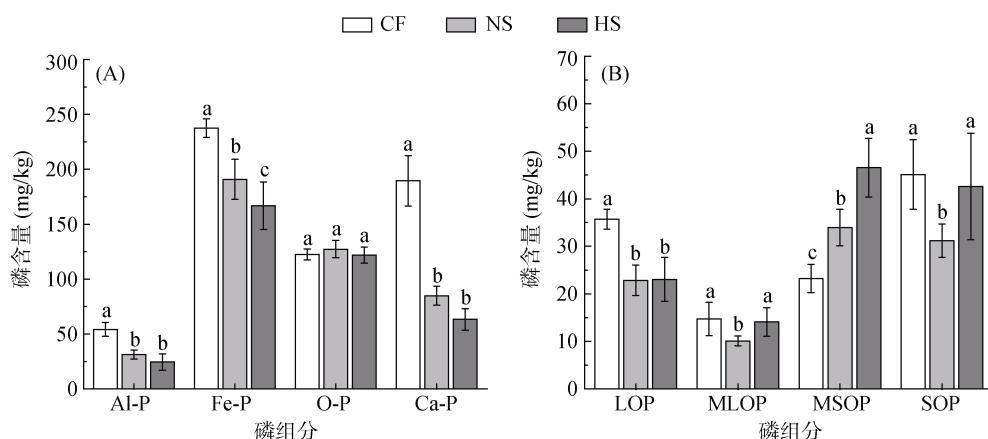
2.3 稼秆替代氮肥对土壤磷组分含量的影响

水稻分蘖期不同施肥处理下的磷组分含量见图 1。在各磷组分中，除 O-P、MLOP、MSOP 和 SOP 外，其他磷组分含量在稼秆替代处理下均显著降低，其中对 Ca-P 的影响最大，与 CF 处理相比，稼秆替代处理 NS 和 HS 的 Ca-P 含量分别显著降低了 55.2% 和 66.6%。MSOP 含量显著增加，且以 HS 处理下的含量最高，与 CF 处理相比，稼秆替代处理 NS 和 HS 的 MSOP 含量分别显著增加了 46.0% 和 100.4%。HS 处理下的 MLOP 和 SOP 含量与 CF 处理没有显著

表4 不同水稻生育期的土壤基本化学性质

Table 4 Soil basic chemical properties at different growth stages of rice

生育期	处理	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	AN (mg/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)	SOM (g/kg)	pH
分蘖期	CF	1.38 ± 0.16 c	0.96 ± 0.25 a	10.92 ± 0.47 a	138.03 ± 8.34 c	12.75 ± 2.12 a	83.1 ± 11.51 c	12.21 ± 1.23 c	5.46 ± 0.03 a
	NS	1.57 ± 0.06 b	0.62 ± 0.04 b	10.96 ± 0.41 a	167.65 ± 9.28 b	7.08 ± 2.91 b	135.13 ± 16.01 b	15.34 ± 0.33 b	5.45 ± 0.07 a
	HS	1.99 ± 0.07 a	0.60 ± 0.09 b	11.50 ± 1.71 a	209.03 ± 22.38 a	5.49 ± 2.32 b	184.50 ± 27.21 a	20.91 ± 0.98 a	5.29 ± 0.06 b
孕穗期	CF	1.14 ± 0.10 c	0.76 ± 0.03 a	10.48 ± 0.52 a	111.30 ± 7.04 c	17.38 ± 3.09 a	47.33 ± 6.31 c	10.99 ± 0.98 c	5.42 ± 0.04 ab
	NS	1.36 ± 0.06 b	0.65 ± 0.06 b	10.30 ± 0.63 a	148.05 ± 11.39 b	13.12 ± 3.32 b	94.67 ± 11.06 b	13.59 ± 1.29 b	5.48 ± 0.10 a
	HS	1.68 ± 0.11 a	0.60 ± 0.04 b	10.94 ± 1.49 a	165.32 ± 17.23 a	9.97 ± 1.75 b	130.17 ± 14.73 a	17.37 ± 1.66 a	5.34 ± 0.05 b
成熟期	CF	1.04 ± 0.04 c	0.84 ± 0.03 a	9.96 ± 0.62 a	99.05 ± 1.64 c	23.81 ± 3.25 a	44.67 ± 3.08 c	12.57 ± 0.67 c	5.43 ± 0.11 a
	NS	1.37 ± 0.02 b	0.72 ± 0.12 b	8.87 ± 1.22 a	121.57 ± 10.04 b	12.74 ± 5.11 b	83.83 ± 20.96 b	15.19 ± 2.06 b	5.28 ± 0.07 b
	HS	1.59 ± 0.06 a	0.61 ± 0.06 c	9.33 ± 0.18 a	142.92 ± 14.27 a	9.50 ± 3.51 b	130.83 ± 5.46 a	19.64 ± 1.18 a	5.24 ± 0.04 b



(Al-P: 铝磷; Fe-P: 铁磷; O-P: 闭蓄态磷; Ca-P: 钙磷; LOP: 活性有机磷; MLOP: 中等活性有机磷; MSOP: 中等稳定性有机磷; SOP: 稳定性有机磷。柱图上方不同小写字母表示同一形态磷在不同处理间差异显著($P<0.05$)。下图同)

图1 水稻分蘖期土壤磷组分含量

Fig. 1 Contents of soil phosphorus components at rice tillering stage

差异, 而与 CF 处理相比, NS 处理下的 MLOP 含量显著降低了 31.4%, SOP 含量显著降低了 30.9%。较为稳定的 O-P 在不同处理下没有显著差异。

水稻孕穗期不同施肥处理下的磷组分含量见图 2。不同处理下的 Al-P、Fe-P、Ca-P 和 SOP 含量均表现为 CF>NS>HS。其中, SOP 含量的变化最大, 与 CF 处理相比, 秸秆替代处理 NS 和 HS 的 SOP 含量分别显著降低了 42.2% 和 44.6%。与 CF 处理相比, HS 处理使 O-P 含量显著降低了 6.0%, 使 MSOP 含量显著增加了 23.8%。与水稻分蘖期不同的是, 孕穗期的 LOP 含量在不同处理间没有显著差异, 但平均含量较分蘖期降低了 43.4%。

水稻成熟期不同施肥处理下的磷组分含量见图 3。除 LOP、MLOP 和 MSOP 外, 各磷组分含量也表现为 CF>NS>HS。与 CF 处理相比, NS 和 HS 处理使 Al-P 含量分别显著降低了 52.5% 和 57.8%; 随着时间的推移, 较为稳定的 O-P 也受到 NS 和 HS 处理

的影响, 其含量分别显著降低了 4.9% 和 2.5%。MLOP、MSOP 和 SOP 含量在 HS 处理下最高, 与 CF 处理相比, HS 处理的 MLOP、MSOP 和 SOP 含量分别显著增加了 25.3%、75.7% 和 42.5%。

总体上, 各磷组分含量在不同水稻生育期存在较大的动态变化。在水稻分蘖期和抽穗期, 秸秆替代处理 (NS 和 HS) 对磷组分的影响并不稳定, 而在水稻成熟期, HS 处理表现出更为显著的影响。

2.4 秸秆替代氮肥对土壤磷库组成的影响

水稻分蘖期不同施肥处理下的磷组分占比见图 4A。CF 处理下磷组分分布为 Fe-P>Ca-P>O-P>Al-P>SOP>LOP>MSOP>MLOP。秸秆替代化肥后, 土壤 Al-P 和 Ca-P 的比例显著降低, O-P 和 MSOP 的比例显著增加, 同时有机磷组分中 MLOP 和 SOP 的比例在 HS 处理下显著增加, 与 CF 相比分别增加了 41.1% 和 40.7%。水稻孕穗期不同施肥处理下的磷组分占比见图 4B。O-P、Ca-P、MLOP 和 MSOP 的比例在不

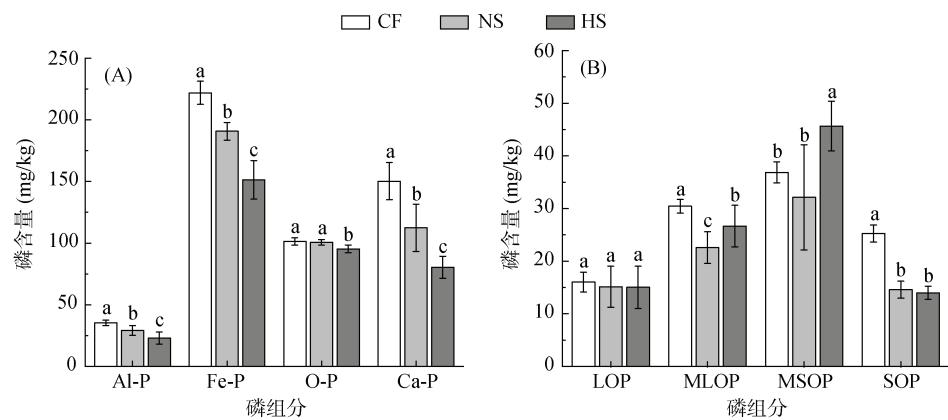


图 2 水稻孕穗期土壤磷组分含量

Fig. 2 Contents of soil phosphorus components at rice booting stage

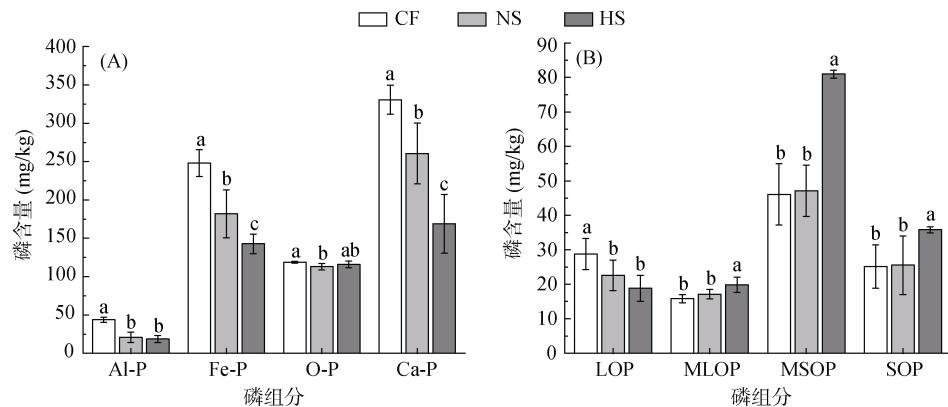


图 3 水稻成熟期土壤磷组分含量

Fig. 3 Contents of soil phosphorus components at rice mature stage

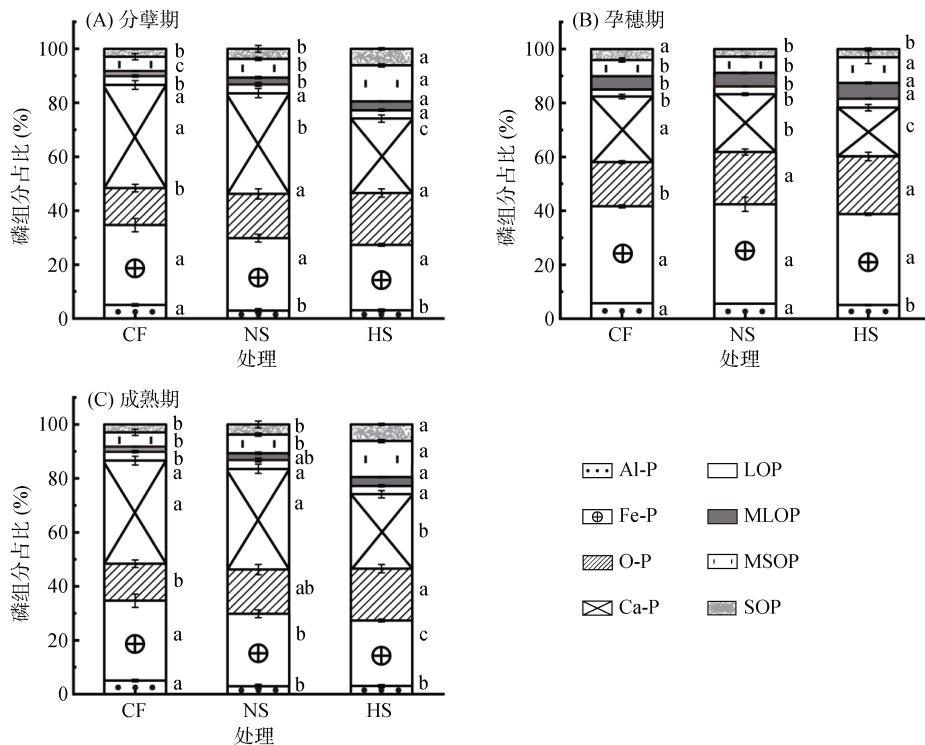


图 4 不同水稻生育期的土壤磷组分占比

Fig. 4 Proportions of soil phosphorus components at different growth stages of rice

同处理间的差异与分蘖期基本一致; 不同的是, 与 CF 处理相比, 稼秆替代处理 NS 和 HS 的 SOP 比例分别降低了 31.5% 和 24.2%, HS 处理下 LOP 的比例显著增加了 28.1%, Al-P 的比例在 CF 和 NS 处理间没有显著差异。

水稻成熟期不同施肥处理下的磷组分占比见图 4C。Ca-P 的比例逐渐占据磷库主体位置, 与 CF 处理相比, 稼秆替代处理 NS 和 HS 下 Al-P 和 Fe-P 的比例均显著降低, O-P 和 MLOP 的比例显著增加, 而 Ca-P 的比例在 HS 处理下显著降低了 27.8%, MSOP 和 SOP 的比例在 HS 处理下分别显著增加了 150.6% 和 110.3%。

总体来看, 随着稼秆替代时间的持续, 无机磷始终是土壤磷库的主体部分, 但在水稻成熟期, Ca-P 逐渐代替了 Fe-P 的主导地位, 同时稼秆替代处理还增加了总有机磷的比例。

2.5 土壤磷组分与土壤化学性质的相关性

由表 5 可知, 在水稻分蘖期, 磷组分与土壤 TN、TP、AN、AP、AK 和 SOM 之间存在显著相关性。

Al-P、Fe-P、Ca-P 和 LOP 与 TP 和 AK 均呈显著正相关; Fe-P、Ca-P 和 LOP 与 AN、AK 和 SOM 均呈显著负相关, Fe-P 还与 TN 呈显著负相关; MSOP 与 TN、AN、AK 和 SOM 均呈显著正相关, 与 pH 呈显著负相关。

由表 6 可知, 在水稻孕穗期, 土壤化学性质主要影响无机磷组分。Al-P、Fe-P 和 Ca-P 与 TP 和 AP 均呈显著正相关, 与 TN、AK 和 SOM 均呈显著负相关, 同时 Fe-P 和 Ca-P 还与 AN 呈显著负相关; SOP 与 TP 呈显著正相关, 与 AN 和 AK 呈显著负相关。

由表 7 可知, 在水稻成熟期, 土壤化学性质对无机磷组分的影响与分蘖期和孕穗期基本一致。Al-P、Fe-P 和 Ca-P 与 TP、AP 和 pH 均呈显著正相关, 与 TN 和 AK 呈显著负相关, Fe-P 还与 AN 和 SOM 呈显著负相关; LOP 与 TP 和 pH 呈显著正相关, 与 TN、AN 和 SOM 均呈显著负相关。

由此来看, 在不同水稻生育期, TN、TP、AN、AP 和 SOM 是影响土壤磷组分变化的关键因素。

表 5 水稻分蘖期土壤磷组分与土壤化学性质的皮尔逊相关性

Table 5 Pearson correlations between soil phosphorus components and soil physicochemical properties at rice tillering stage

	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	LOP	MLOP	MSOP	SOP
TN	-0.597	-0.817**	-0.175	-0.661	-0.637	0.130	0.925**	0.087
TP	0.986**	0.729*	-0.536	0.976**	0.808**	0.580	-0.533	0.468
TK	-0.010	-0.257	-0.298	-0.148	-0.263	0.204	0.464	0.252
AN	-0.648	-0.811**	-0.146	-0.719*	-0.693*	0.000	0.926**	-0.017
AP	0.903**	0.928**	-0.404	0.930**	0.797*	0.229	-0.661	0.255
AK	-0.663	-0.852**	-0.055	-0.757*	-0.706*	-0.057	0.957**	-0.127
SOM	-0.694*	-0.901**	-0.122	-0.730*	-0.801**	0.141	0.691*	0.260
pH	0.490	0.543	0.071	0.522	0.357	-0.104	-0.788*	-0.003

注: *、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平相关性显著, 下表同。

表 6 水稻孕穗期土壤磷组分与土壤化学性质的皮尔逊相关性

Table 6 Pearson correlations between soil phosphorus components and soil physicochemical properties at rice booting stage

	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	LOP	MLOP	MSOP	SOP
TN	-0.775*	-0.884**	-0.503	-0.906**	-0.043	-0.098	0.378	-0.614
TP	0.831**	0.902**	0.404	0.914**	0.397	0.473	0.186	0.840**
TK	0.117	-0.103	-0.353	-0.033	-0.019	0.271	0.351	0.139
AN	-0.657	-0.778*	-0.452	-0.908**	-0.086	-0.097	0.309	-0.712*
AP	0.894**	0.892**	0.344	0.909**	0.188	0.359	0.123	0.741*
AK	-0.696*	-0.871**	-0.421	-0.911**	-0.273	-0.224	0.24	-0.790*
SOM	-0.744*	-0.826**	-0.421	-0.891**	0.067	0.015	0.382	-0.589
pH	0.391	0.477	0.428	0.494	0.042	-0.114	-0.038	0.035

表 7 水稻成熟期土壤磷组分与土壤化学性质的皮尔逊相关性
Table 7 Pearson correlations between soil phosphorus components and soil physicochemical properties at rice mature stage

	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	LOP	MLOP	MSOP	SOP
TN	-0.869**	-0.883**	-0.171	-0.869**	-0.836**	0.534	0.534	0.439
TP	0.871**	0.942**	0.319	0.955**	0.733*	-0.338	-0.472	-0.490
TK	0.413	0.305	0.114	0.136	0.563	-0.274	0.362	0.186
AN	-0.658	-0.743*	0.036	-0.646	-0.690*	0.455	0.557	0.034
AP	0.971**	0.953**	0.441	0.863**	0.579	-0.304	-0.563	-0.388
AK	-0.721*	-0.772*	-0.134	-0.757*	-0.649	0.481	0.670*	0.386
SOM	-0.597	-0.686*	0.120	-0.650	-0.752*	0.522	0.546	0.172
pH	0.690*	0.716*	-0.180	0.734*	0.919**	-0.063	-0.226	-0.363

3 讨论

3.1 稼秆替代氮肥对水稻产量和土壤化学性质的影响

数据表明, 2020 年我国农作物秸秆资源总量约为 7.72 亿 t, 年产量位居世界第一^[14]。作物吸收的养分有较多保留在秸秆中, 养分资源量巨大, 充分利用好秸秆资源是实现化肥减施和土壤培肥的重要途径^[11]。已有研究表明, 秸秆还田能够提升作物产量^[15-17], 但秸秆替代部分化肥对作物产量的效果却不尽相同^[18-20]。本研究结果表明, 在养分投入量相同的情况下, 秸秆替代处理 (NS 和 HS) 能够显著增加水稻产量, 对籽粒产量的提升效果显著。秸秆作为一种重要的有机养分资源, 不仅能为作物提供生长必需的氮、磷、钾和中微量元素, 还富含纤维素、半纤维素、木质素和糖类等有机能源^[21]; 同时, 与化学肥料相比, 秸秆的养分释放慢, 能够在作物生长期提供持续的营养补给, 从而促进水稻增产。

本研究发现, 秸秆替代处理 (NS 和 HS) 增加了水稻结实率、每穗实粒数和有效穗数, 这与前人的研究结果相符^[22]。一方面, 秸秆替代部分氮肥能够促进水稻根系发育, 增加根系的养分吸收和地上部干物质累积; 另一方面, 水稻的穗部和叶部作为主要的养分转运器官, 影响着植株的养分分配, 对施肥措施的响应可能会更直观^[23-24]。因此, 水稻结实率、每穗实粒数和有效穗数对秸秆替代的响应也是水稻产量增加的原因, 秸秆替代可能通过改善土壤肥力, 影响植株养分分配, 从而调控产量构成因素和产量变化。

作物产量往往是土壤质量最直观的体现, 土壤养分含量的变化也直接影响着土壤质量。研究表明, 秸秆还田能够改善土壤理化性质, 提升土壤养分供给能力^[24]。本研究也发现, 秸秆替代处理 (NS 和 HS) 使土壤 TN、AN、AK 和 SOM 的含量显著增加, 且均

表现为 HS>NS>CF。秸秆本身就是一种微生物碳源, 能够激发土壤微生物活性, 促进秸秆中的营养元素在土壤中累积, 进而增加土壤养分含量^[22]。本研究还发现, 土壤 TP 和 AP 含量在秸秆替代处理 (NS 和 HS) 下呈显著降低的趋势。前人研究表明, 施用秸秆能够提高水稻对磷素的吸收和利用, 这可能导致土壤磷盈余量降低, 进而影响土壤磷库储量; 其次, 秸秆本身的磷含量较低, 其养分释放会受到多方面因素的制约, TP 和 AP 含量的降低可能受到秸秆磷素释放速率和化学磷肥损失的共同影响^[25-26]。施用秸秆还能提高土壤孔隙度, 这也可能引起磷在土壤中的下渗^[27-28]。此外, 秸秆替代氮肥处理使土壤 pH 在水稻分蘖期和成熟期显著降低, 这可能是秸秆分解过程中积累的酸性分解产物所致^[29]。

3.2 秸秆替代氮肥对土壤磷组分的影响

土壤中的磷可分为无机磷和有机磷两大类, 主要耕作土壤中的无机磷约占全磷的 60%~80%, 包括多种原生磷矿物和次生无机磷酸盐等^[30]。本研究采用 Chang 和 Jackson^[12]提出的分级方法将无机磷分为 Al-P、Fe-P、O-P 和 Ca-P 四种形态, 结果表明, 不同处理下无机磷组分的含量变化在不同水稻生育期均呈现相似的趋势。Al-P、Fe-P 和 Ca-P 在不同处理下的含量变化均表现为 CF>NS>HS, 这可能是秸秆分解导致土壤胶体吸附位点饱和, 进而减少了铝和铁等金属氧化物对磷的吸附^[31]。与其他组分相比, O-P 是一种稳定性较强的磷组分, 分蘖期的 O-P 含量在不同处理间没有显著差异, 而在孕穗期和成熟期逐渐表现出减少趋势, 随着时间的推移, 说明秸秆替代氮肥可能会促进土壤中的难利用态磷向有效态磷转化^[32]。本研究中, 秸秆替代处理显著降低了分蘖期和成熟期的 LOP 含量, 这可能是由于秸秆中的磷释放较慢, 影响了土壤微生物的养分供应, 从而导致土壤微生物生物量磷和磷素活化水平降低。此外, 秸秆替代处理还使

总有机磷在磷库中的占比增加，在水稻成熟期更为明显，这可能是由于秸秆中大部分磷是难以降解的有机磷，需要一定的时间和特定的环境条件才能释放^[33]。虽然无机磷和有机磷所占总磷的比例不同，但它们之间的比率比较稳定，无机磷可能在土壤磷库中发挥着更大的作用，组分之间通过互相迁移转化使二者保持动态平衡，该结果与前人研究^[34]基本一致。

3.3 土壤磷组分与土壤化学性质的相关性

土壤磷的形态转化过程影响磷的有效性^[35]。TP 和 AP 能够衡量土壤磷素的活性水平。本研究结果表明，Al-P、Fe-P 和 Ca-P 与 TP 和 AP 呈显著正相关关系，且这 3 种组分在土壤磷库中的占比较大。Hu 等^[36]研究结果显示，土壤中的磷至少有 70% ~ 90% 会以 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 的稳定形式被吸附或固定，是土壤磷库的主要支柱。前人研究发现，SOM、pH 和 TN 是影响土壤磷组分变化的主导因子^[37]。本研究中，SOM 与 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 之间均呈显著负相关关系，即 SOM 增加会减少磷的吸附位点，增加磷的移动性，从而提高磷的有效性；秸秆替代化肥条件下，土壤 TN 含量增加，pH 降低，会影响土壤溶液中活性氧化铁/铝的含量，导致金属吸附态磷的解吸，促进难溶性无机磷组分向易溶性无机磷转化^[38]。此外，AK 也是影响磷组分的一个因素，它可能通过促进根系生长来刺激根系与土壤互作产生根系分泌物，促使土壤中难溶性磷的转化^[39]。

4 结论

1) 秸秆替代氮肥能够有效促进水稻植株干物质的积累，进而通过提升结实率、每穗实粒数以及有效穗数来实现水稻增产，其中以秸秆替代 2/3 氮肥处理 (HS) 的效果尤为显著。

2) 秸秆替代氮肥有助于提升土壤肥力，显著增加土壤中的 TN、AN、AK 和 SOM 含量，但土壤 TP 和 AP 含量显著下降。在水稻成熟期，秸秆替代氮肥还会显著降低土壤 pH，增加土壤酸化的风险。

3) 在土壤磷素形态变化方面，秸秆替代氮肥显著减少了土壤中的 Al-P、Fe-P 和 Ca-P 含量，同时在水稻成熟期显著提高了总有机磷的占比。有机磷与无机磷之间的比率变化相对稳定，在水稻的不同生育期内基本维持动态平衡。土壤化学性质主要影响无机磷组分，而 TN、TP、AN、AP 和 SOM 是驱动难溶性无机磷变化的关键因素。

4) 生产实践中，在满足水稻生长所需养分供应的基础上，采用秸秆替代部分氮肥既能保障农业养分

资源的利用，又能缓解过量施用化肥所带来的负面效应，是值得推广的施肥措施。

致谢：感谢湖南农业大学新型肥料研发实验室周长宽和雷泽统在土壤检测过程中提供的帮助。

参考文献：

- [1] Carrijo D R, Lundy M E, Linquist B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 173–180.
- [2] Ding W C, Xu X P, He P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 227: 11–18.
- [3] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3–8.
- [4] 宁建凤, 陈勇, 姚建武, 等. 珠三角赤红壤常年连作菜地土壤磷库特征[J]. 草业学报, 2025, 34(2): 133–148.
- [5] 徐达兼, 杨锴, 孟鹏飞, 等. 不同磷水平土壤以碳促磷效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(11): 2095–2107.
- [6] Yang C D, Lu S G. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol[J]. Science of The Total Environment, 2022, 805: 150325.
- [7] Wang Y, Zhao X, Guo Z Y, et al. Response of soil microbes to a reduction in phosphorus fertilizer in rice-wheat rotation paddy soils with varying soil P levels[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 181: 127–135.
- [8] Zafar M, Tiecher T, de Castro Lima J A M, et al. Phosphorus seasonal sorption-desorption kinetics in suspended sediment in response to land use and management in the Guaporé catchment, Southern Brazil[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(11): 643.
- [9] 宋大刚, 胡晗颖, 卢兰, 等. 1988—2018 年青藏高原玉米秸秆资源时空分布特征及还田替代化肥潜力[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(6): 1124–1132.
- [10] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2695–2702.
- [11] 袁浩亮, 张江林, 鲁艳红, 等. 紫云英和秸秆替代部分化肥对双季稻产量、养分含量及土壤综合肥力的影响[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1216–1222.
- [12] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. Soil Science, 1957, 84(2): 133–144.
- [13] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95–101.
- [14] 岳佳怡, 杨兰文, 方柏森, 等. 响应面法优化玉米秸秆生物炭的改性工艺[J]. 现代化工, 2024, 44(S1): 172–178, 184.

- [15] Xiao L G, Zhao R Q, Kuhn N J. Straw mulching is more important than no tillage in yield improvement on the Chinese Loess Plateau[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104314.
- [16] 骆美, 李静, 高庭峰, 等. 不同施肥对稻田氮磷流失的影响及机制分析[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(1): 126–139.
- [17] 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 稻秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1360–1373.
- [18] 张怀志, 唐继伟, 袁硕, 等. 基于农户调查的津冀地区设施蔬菜化肥减施潜力分析[J]. 中国土壤与肥料, 2022(11): 48–55.
- [19] 史津玮. 连续施用蚯粪对设施土壤钾素有效性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [20] 王婉秋, 李仕培, 李辉, 等. 川东北麦秆还田对水稻氮素吸收转运的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 10–14.
- [21] 王静, 丁树文, 程益涵, 等. 化肥减量配施生物炭和秸秆对砂姜黑土区水稻产量、养分吸收和土壤碳的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(5): 116–125.
- [22] 李金烨, 陈洁, 吴建富, 等. 秸秆及其生物炭还田对水稻养分吸收分配和产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(5): 1118–1128.
- [23] 杨正宇, 李宗明, 李言言, 等. 连续 11 年不同秸秆还田量下稻田甲烷增排效应变化研究[J/OL]. 土壤学报, 2024: 1–13. (2024–07–22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=TRXB20240717002>.
- [24] 刘艳, 叶鑫, 包红静, 等. 秸秆还田配施化肥对春玉米耕层土壤理化性质及产量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 254–261.
- [25] 苗欢, 乔云发, 唐煜杰, 等. 短时暴雨条件下秸秆和生物炭还田对水稻磷素表观利用率的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 241–246.
- [26] 陈婷. 稻田土壤微生物及磷素运移对磷肥调控与秸秆还田的响应[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [27] 杨立达, 彭新月, 朱文雪, 等. 稻秆还田与灌溉方式对大豆玉米带状间作苗及幼苗生长的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(17): 3366–3383.
- [28] 廖正武, 苏跃, 李航, 等. 土壤质量变化对地表径流水质量的影响[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(12): 112–116.
- [29] 谢婷婷, 肖厚军, 陈云梅, 等. 贵州春玉米产量构成要素和养分积累及利用效率对不同秸秆还田和耕作方式的响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1056–1062.
- [30] 丁怀香, 宇万太. 土壤无机磷分级及生物有效性研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 681–686.
- [31] Novais S V, Zenero M D O, Tronto J, et al. Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with MgCl₂ for phosphorus adsorption[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 214: 36–44.
- [32] 丁井魁. 长期不同秸秆还田措施影响石灰性土壤磷素有效性的机制[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- [33] 张建. 棉秆粉碎还田腐解与土壤肥力的响应关系[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
- [34] 郭刘明, 卢树昌. 不同调理剂施用对富磷土壤磷素吸收及其形态变化影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 488–494.
- [35] 冯杰. 氮磷添加对杉木人工林土壤磷有效性的影响机制[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [36] Hu W, Zhang Y P, Rong X M, et al. Coupling amendment of biochar and organic fertilizers increases maize yield and phosphorus uptake by regulating soil phosphatase activity and phosphorus-acquiring microbiota[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 355: 108582.
- [37] 胡一帆, 刘宣, 李宇, 等. 华西雨屏区不同林龄柳杉人工林土壤磷组分特征[J]. 生态学报, 2024, 44(2): 686–698.
- [38] 崔宸阳, 李静, 杨子, 等. 土壤闭蓄态磷的形成、转化与利用途径[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1413–1421.
- [39] 赵文军, 薛开政, 杨继周, 等. 烤烟-绿肥轮作对烤烟产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(25): 8–15.