

毛 伟, 曾洪玉, 李文西, 等. 不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1189-1196.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.016

不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响

毛 伟^{1,2}, 曾洪玉³, 李文西^{1,2}, 唐宝国³, 姚开文³, 陈 明¹, 赵海涛²

(1.扬州市耕地质量保护站,江苏 扬州 225009; 2.扬州大学环境科学与工程学院,江苏 扬州 225127; 3.扬州市江都区农业技术推广中心,江苏 扬州 225200)

摘要: 探讨不同基础肥力条件下有机氮替代化学氮对小麦产量构成和土壤养分含量的影响,为减少化学氮肥施用和科学的小麦肥料运筹提供基础支撑。采用大田试验方法,以长江下游平原河网区习惯施肥为依据,在高、中、低肥力条件下采用不同比例的有机氮替代化学氮,以不施氮、磷、钾化肥和仅施用磷、钾化肥为对照,分析了不同有机氮替代率下小麦产量及产量构成、小麦植株氮、磷、钾含量以及土壤养分赋存特征。结果表明,1)同时施用氮、磷、钾化肥能够显著增加各肥力条件下小麦产量、小麦有效穗数、穗粒数及千粒质量以及土壤有效磷和有机质含量,显著增加高肥力土壤中速效钾含量以及中肥力土壤中速效钾、全氮含量,显著降低低肥力土壤的 pH。仅施用磷、钾肥能够显著提高高肥力土壤中有效磷和速效钾含量以及中肥力土壤中有效磷含量。2)有机氮完全替代化学氮会显著降低小麦产量、小麦有效穗数。3)高、中肥力条件下有机氮替代10%~30%化学氮以及低肥力条件下有机氮替代20%~30%化学氮对小麦产量构成无显著影响。高、中、低肥力条件下有机氮替代10%~40%化学氮对土壤有效磷、速效钾、全氮和 pH 无显著影响,在中、低肥力条件下有机氮替代20%~50%化学氮能显著增加土壤有机质含量。可见,长江下游平原河网区麦田肥料运筹中,低肥力条件下有机氮替代20%~30%化学氮,高、中肥力条件下有机氮替代10%~30%化学氮较为适宜。

关键词: 有机氮肥; 化学氮肥; 小麦; 产量构成; 土壤养分

中图分类号: S146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)05-1189-08

Effects of organic nitrogen replacing chemical nitrogen on wheat yield components and soil nutrients under different soil fertility

MAO Wei^{1,2}, ZENG Hong-yu³, LI Wen-xi^{1,2}, TANG Bao-guo³, YAO Kai-wen³, CHEN Ming¹, ZHAO Hai-tao²

(1. Yangzhou Cultivated Land Quality Protection Station, Yangzhou 225009, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 3. Jiangdu Agricultural Technology Promotion Center, Yangzhou 225200, China)

Abstract: In order to provide basic support for reducing the application of chemical nitrogen (N) and scientific operation of wheat fertilizer, the effects of organic N replacing chemical N on wheat yield components and soil nutrient content under different basic fertility conditions were studied. The method of field experiment was adopted, and the conventional fertilization in the plain river network area of the lower reaches of the Yangtze River was used as the basis of fertilizer operation. Organic N was used to replace chemical N under the conditions of high, medium and low fertility. The yield and yield components of wheat, the contents of N, phosphorus (P) and potassium (K) in wheat plants and the

收稿日期: 2020-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201303); 扬州市校企合作专项(YZ2019136)

作者简介: 毛 伟(1983-), 男, 江苏兴化人, 硕士, 高级农艺师, 主要从事耕地质量建设与管理研究。(Tel) 0514-87346579; (E-mail) maowei918@163.com

zation in the plain river network area of the lower reaches of the Yangtze River was used as the basis of fertilizer operation. Organic N was used to replace chemical N under the conditions of high, medium and low fertility. The yield and yield components of wheat, the contents of N, phosphorus (P) and potassium (K) in wheat plants and the

characteristics of soil nutrients were analyzed. The results showed that the application of N, P and K fertilizers at the same time could significantly increase the yield of wheat, the effective panicle number, the grain number per panicle, the 1000-grain weight and the contents of soil available P and organic matter. This fertilization strategy also significantly increased the content of available K in high fertility soil and the contents of available K and total N in medium fertility soil, but significantly reduced the pH of low fertility soil. Only applying P and K fertilizers could significantly improve the contents of available P and K in high fertility soil, and the available P content in medium fertility soil. The total substitution of organic nitrogen for chemical N significantly reduced the wheat yield and effective panicle number. The substitution of 10%–30% chemical nitrogen by organic N under the conditions of high and medium fertility, and the substitution of 20%–30% chemical N by organic N under the condition of low fertility had no significant effect on wheat yield. The replacement of 10%–40% chemical N by organic N had no significant effect on available P, available K, total N and pH under the conditions of high, medium and low fertility, but the replacement of 20%–50% could significantly increase the content of soil organic matter under the conditions of medium and low fertility. In conclusion, under the condition of low fertility, it is more suitable to replace 20%–30% of chemical N with organic N in the wheat field of the plain and river network area in the lower reaches of the Yangtze River. Under the conditions of high and medium fertility, 10%–30% substitution is suitable.

Key words: organic nitrogen; chemical nitrogen; wheat; yield components; soil nutrients

肥料是农业生产的重要物质基础,是作物的“粮食”,对农业生产起着不可替代的作用,合理的肥料运筹是农作物高产稳产和培肥土壤的重要保障^[1-2]。化肥是粮食增产的决定因子,在保障农产品安全中发挥了举足轻重的作用^[3]。谷类作物化肥用量从 1980 年 2.7×10^7 t 增加到 2014 年的 3.4×10^7 t,且近年来仍持续增长^[4-5]。化肥过量使用造成的肥料利用率降低、土壤理化性状恶化、土壤污染等问题日益凸现,严重威胁了中国生态农业的可持续发展^[6-8]。减少化肥用量,提升耕地地力是中国生态农业可持续发展的迫切需要。有机、无机肥料合理配施是维持和提高地力,培肥土壤,提高肥料利用率的重要途径^[9-10]。有机肥料和无机肥料配合施用,既能提高土壤肥力,改善土壤理化性质,提高土壤微生物活性,又能确保作物高产稳产^[11-14]。近年来,随着人们对土壤和农业环境的关注度越来越高,有机肥替代化肥成为关注的焦点。研究结果表明,不同作物、不同土壤条件,有机氮替代无机氮的比例不同,增产效果不同。中国西南地区中性紫色土中有机氮替代 50% 化肥氮能够确保玉米稳定高产^[15],南方水稻土中 10%~20% 的有机肥替代化肥处理可获得最佳的水稻产量、氮肥利用率和经济效益^[16]。黄土高原西部全膜双垄沟播玉米栽培中,37.5%~50.0% 的有机氮替代无机氮比较适宜^[17]。现有研究主要在相同基础地力条件下开展^[18-19],缺少同一区域不同肥力水平的对比研究,长江下游河网区是中国重要的小麦生产基地,探明有机氮替代无机氮对小麦生产的影响具有重要意义。本研究在高、中、低 3 个耕地肥力水平下采用有机

氮等量替代无机氮的肥料运筹方式,探究其对小麦产量、养分吸收及土壤养分赋存的影响,明确不同基础肥力下适宜的有机氮替代率,为化肥减量增效和小麦绿色生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

采用大田试验的方法,于 2017–2018 年在长江下游平原河网区稻麦典型栽培区域扬州市江都区郭村镇、小纪镇和仙女镇实施。依据农业部“耕地质量等级”(GB/T 33469–2016)划分标准,试验区土壤分为高肥力水平(H,郭村镇)、中肥力水平(M,小纪镇)和低肥力水平(L,仙女镇)3 个类型,3 个试验点的成土母质均为“老长江冲积物”,土壤类型为水稻土,土壤质地为壤土。试验前各试验田耕层土壤基本性质见表 1。

表 1 试验区土壤基础理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the experimental area

土壤基础 肥力等级	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
高肥力(H)	6.48	30.35	1.15	23.1	132
中肥力(M)	7.72	25.74	1.09	16.5	80
低肥力(L)	7.17	18.42	0.85	11.8	52

供试商品有机肥有机质 $\geq 40\%$, N 1.96%、 P_2O_5 2.42%、 K_2O 0.64%。供试氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 12%),钾肥为氯化钾(K_2O

60%)。试验以当地习惯施肥量为基础(N 235.2 kg/hm²、P₂O₅ 90.0 kg/hm²、K₂O 76.8 kg/hm²),以等量氮替换为原则,用有机氮(有机肥)替换化肥氮(尿素)。设置以下处理:不施肥(CK),仅施化学磷钾肥(N₀PKM₀),当地习惯施用氮磷钾化肥(N₁₀PKM₀),仅施用有机肥处理(N₀PKM₁₀),有机氮与化学氮1:9配比(N₉PKM₁),有机氮与化学氮2:8配比(N₈PKM₂),有机氮与化学氮3:7配比(N₇PKM₃),有机氮与化学氮4:6配比(N₆PKM₄),有机氮与化学氮5:5配比(N₅PKM₅)。有机肥替代尿素后,用氯化钾补齐各处理中K₂O至76.8 kg/hm²,用过磷酸钙将处理中P₂O₅补齐至90.0 kg/hm²。其中N₁₀PKM₀、N₆PKM₄和N₅PKM₅处理的有机肥料中P₂O₅含量分别为290.0 kg/hm²、116.2 kg/hm²和145.2 kg/hm²,不补充过磷酸钙。各处理肥料配比见表2。

试验分别在高(H)、中(M)、低(L)3个土壤肥力水平田块中进行,每个土壤肥力水平田块中设9个肥料处理,每个处理3次重复。每个肥力水平试验区1 200 m²,每个处理小区35 m²(5 m×7 m),小区间田埂用农膜包裹,四周设保护行,随机区组排列。试验

区稻麦轮作,2017年11月种植小麦,2018年6月收获。供试小麦品种为扬辐麦4号,种植密度为1 hm² 2.40×10⁶株。

小麦肥料运筹为有机肥和磷肥全部作为基肥一次性施用,钾肥的基肥和拔节孕穗肥比例为6:4,无机氮肥的基肥、苗肥和拔节孕穗肥比例为5:2:3。各处理肥料运筹见表3。

表2 各处理肥料用量

Table 2 Fertilizer consumption of each treatment

处理	化学肥料 (kg/hm ²)			有机肥料 (kg/hm ²)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	0	0	0	0
N ₀ PKM ₀	0	90.00	76.8	0
N ₁₀ PKM ₀	235.2	90.00	76.8	0
N ₀ PKM ₁₀	0	0	0	12 000
N ₉ PKM ₁	211.7	61.00	69.1	1 200
N ₈ PKM ₂	188.2	31.90	61.4	2 400
N ₇ PKM ₃	164.6	2.88	53.8	3 600
N ₆ PKM ₄	141.1	0	46.1	4 800
N ₅ PKM ₅	117.6	0	38.4	6 000

表3 各处理的肥料运筹

Table 3 Fertilizer operation of each treatment

处理	基肥 (kg/hm ²)				分蘖肥 (kg/hm ²)		拔节孕穗肥 (kg/hm ²)	
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥	N	N	K ₂ O	
N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	—	—	—	—	—	—	—	—
N ₀ PKM ₀	—	90.0	46.1	—	—	—	30.7	
N ₁₀ PKM ₀	117.6	90.0	46.1	—	47.0	70.6	30.7	
N ₀ PKM ₁₀	—	—	—	12 000	—	—	—	
N ₉ PKM ₁	94.1	61.0	38.4	1 200	47.0	70.6	30.7	
N ₈ PKM ₂	70.6	31.9	30.7	2 400	47.0	70.6	30.7	
N ₇ PKM ₃	47.0	2.88	23.1	3 600	47.0	70.6	30.7	
N ₆ PKM ₄	23.0	—	15.4	4 800	47.0	70.6	30.7	
N ₅ PKM ₅	—	—	7.7	6 000	47.0	70.6	30.7	

CK:不施肥;N₀PKM₀:仅施化学磷钾肥;N₁₀PKM₀:按当地习惯施用氮磷钾化肥;N₀PKM₁₀:仅施用有机肥处理;N₉PKM₁:有机氮与化学氮1:9配比;N₈PKM₂:有机氮与化肥氮2:8配比;N₇PKM₃:有机氮与化肥氮3:7配比;N₆PKM₄:有机氮与化肥氮4:6配比;N₅PKM₅:有机氮与化肥氮5:5配比。

1.2 测定项目及方法

小麦种植前(2017年11月)和收获后(2018年6月)采集耕层土壤(0~15 cm)测定土壤理化性质,小麦成熟时(2018年6月)测定小麦产量和产量构成,同时采集植株样品测定植株和籽粒氮、磷、钾含量。

小麦产量测定:2018年5月上旬,各小区随机

取3个点,每个点取1 m²调查穗数,并从中随机取20穗调查穗粒数。6月上旬实收计产,统计籽粒和秸秆产量。将小麦植株和籽粒分别粉碎,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,半微量凯氏定氮法测定氮含量,钼蓝比色法测定磷含量,火焰光度法测定钾含量^[20]。氮吸收量由植株和籽粒中氮含量与生物量

乘积后相加得到。土壤全氮采用半微量凯氏法测定;有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 浸提,钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1.0 mol/L NH_4OAc 浸提,火焰光度法测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定^[20]。

1.3 数据统计与分析

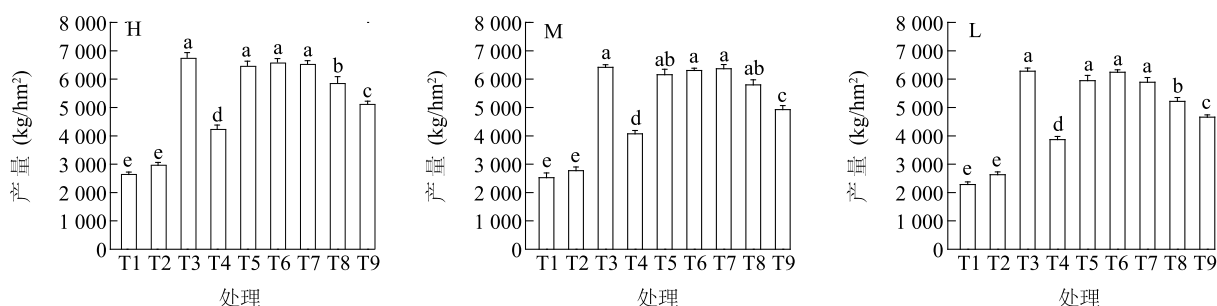
采用 Microsoft Excel 2010 整理试验数据,SPSS 17.0 软件进行数据统计分析,Origin 8.5 软件进行作图。采用 Duncan's 法进行处理间差异显著性检验 ($P < 0.05$ 差异显著)。

2 结果与分析

2.1 有机氮替代化学氮对小麦产量的影响

不同肥力条件下,肥料运筹对小麦产量影响显著。由图 1 可知,与不施肥对照 ($\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$) 相比,土壤低肥力水平下农民习惯施肥 ($\text{N}_{10}\text{PKM}_0$) 处理能够显著增产 2.75 倍;土壤中肥力水肥水平下, $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理能够显著增产 2.54 倍;高肥力水平下, $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理能够显著增产 2.57 倍。可见,各肥力水平下农

民习惯施肥处理均可显著增加小麦产量,土壤低肥力水平下施肥增产效果更明显。3 种肥力水平下,仅施磷、钾肥 (N_0PKM_0) 处理小麦产量与 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$ 处理差异均不显著,但显著小于 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理。可见,在肥料运筹中,氮对小麦产量的影响比磷、钾更大。全部施用有机氮处理显著高于 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$ 处理,但是显著低于 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理;低、中、高肥力水平下 $\text{N}_0\text{PKM}_{10}$ 处理小麦产量仅为 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理小麦产量的 61.6%、63.5% 和 62.6%,可见施用有机肥能够提升不同土壤肥力水平下小麦的产量,但提升效果弱于化学氮肥。低肥力和高肥力水平下,10%~30% 有机氮替代化学氮处理的小麦产量与 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理间差异不显著,但 40% 和 50% 有机氮替代化学氮处理的小麦产量显著低于 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理;中肥力水平下,10%~40% 有机氮替代化学氮处理的小麦产量与 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理差异不显著,但 50% 有机氮替代化学氮处理的小麦产量显著低于 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理。总体来看,在低、中、高肥力条件下种植小麦,10%~30% 有机氮替代化学氮是可行的。



H: 高肥力土壤; M: 中等肥力土壤; L: 低等肥力土壤。T1 为 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$, T2 为 N_0PKM_0 , T3 为 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$, T4 为 $\text{N}_0\text{PKM}_{10}$, T5 为 N_9PKM_1 , T6 为 N_8PKM_2 , T7 为 N_7PKM_3 , T8 为 N_6PKM_4 , T9 为 N_5PKM_5 。 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$ 、 N_0PKM_0 、 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 、 $\text{N}_0\text{PKM}_{10}$ 、 N_9PKM_1 、 N_8PKM_2 、 N_7PKM_3 、 N_6PKM_4 、 N_5PKM_5 见表 3 注。图中相同肥力土壤不同小写字母表示 0.05 水平上差异显著。

图 1 有机氮替代化学氮对小麦产量的影响

Fig.1 Effects of organic nitrogen replacing chemical nitrogen on wheat yield

2.2 有机氮替代化学氮对小麦产量构成的影响

施肥各处理增加了小麦有效穗数、每穗实粒数及千粒质量。由表 4 可知,与 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$ 相比,高、中、低肥力水平下 N_0PKM_0 处理的有效穗数、穗粒数和千粒质量均有增加的趋势,但效果不显著。与 $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0\text{M}_0$ 相比,土壤低、中、高肥力水平下 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 能够显著增加小麦有效穗数、穗粒数和千粒质量。可见,仅施用磷、钾肥对小麦产量构成因素无显著提升效果,施用氮、磷、钾肥料能够显著增加小麦的有效穗数、每穗粒数及千粒质量。

表 4 还表明,低、中、高肥力下 $\text{N}_0\text{PKM}_{10}$ 处理的有效穗数均显著小于 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理,高肥力和低肥力条件下 $\text{N}_0\text{PKM}_{10}$ 处理的穗粒数显著小于 $\text{N}_{10}\text{PKM}_0$ 处理,不同肥力条件下有机氮完全替代化学氮对小麦千粒质量影响不显著。进一步分析可知,在高、中、低肥力条件下有机氮替代化学氮高达 50% 会显著降低小麦有效穗数、穗粒数和千粒质量,有机氮替代化学氮达到 40% 时显著降低穗粒数,20%~40% 有机氮替代化学氮对小麦有效穗数无显著影响,10%~30% 有机氮替代化学氮对小麦千

粒质量无显著影响。综合来看,低肥力条件下,有机氮替代20%~30%化学氮对小麦产量构成无显著影响;高、中肥力条件下,有机氮替代10%~30%化学氮对小麦产量构成无显著影响。

表4 有机氮替代化学氮对小麦产量构成的影响特征

Table 4 Effects of organic nitrogen replacing chemical nitrogen on yield components of wheat

土壤肥力	处理	有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)
高肥力土壤	N ₅ PKM ₅	538.9±5.6b	26.93±0.42e	40.41±0.43cd
	N ₆ PKM ₄	584.8±11.2a	27.73±0.65cd	41.11±0.30bc
	N ₇ PKM ₃	595.2±4.0a	29.33±0.11ab	42.43±0.46a
	N ₈ PKM ₂	597.7±8.0a	29.46±0.05ab	42.33±0.27ab
	N ₉ PKM ₁	579.4±3.5a	28.96±0.39abc	42.62±0.35a
	N ₀ PKM ₁₀	395.4±5.5c	28.44±0.45bc	41.97±0.33ab
	N ₁₀ PKM ₀	596.3±7.8a	30.19±0.64a	42.19±0.50ab
	N ₀ PKM ₀	327.5±4.7d	25.02±0.50e	39.83±0.12d
	N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	316.7±8.9d	23.93±0.29e	39.64±0.60d
中肥力土壤	N ₅ PKM ₅	528.4±8.7b	25.77±0.65cd	39.72±0.38c
	N ₆ PKM ₄	562.3±10.8a	26.25±0.61bc	40.28±0.57bc
	N ₇ PKM ₃	575.2±5.4a	27.86±0.28ab	42.09±0.67a
	N ₈ PKM ₂	576.7±7.8a	28.40±0.41a	42.05±0.65a
	N ₉ PKM ₁	557.2±3.3a	27.70±0.60ab	42.79±0.27a
	N ₀ PKM ₁₀	382.7±7.7c	26.84±0.42abc	42.48±0.45a
	N ₁₀ PKM ₀	573.4±7.5a	28.48±0.60a	41.64±0.33ab
	N ₀ PKM ₀	315.5±4.0d	24.32±0.60de	39.57±0.40c
	N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	305.5±8.7d	22.91±0.32e	39.40±0.61c
低肥力土壤	N ₅ PKM ₅	525.6±9.2d	25.94±0.47c	38.19±0.20c
	N ₆ PKM ₄	554.9±6.8bc	26.31±0.49bc	39.88±0.56b
	N ₇ PKM ₃	568.0±6.4abc	27.75±0.41ab	41.67±0.66a
	N ₈ PKM ₂	579.4±5.2a	28.41±0.37a	41.63±0.65a
	N ₉ PKM ₁	549.9±4.9c	27.86±0.43ab	42.37±0.27a
	N ₀ PKM ₁₀	377.7±4.5e	24.97±0.99cd	42.20±0.43a
	N ₁₀ PKM ₀	573.4±8.0ab	28.18±0.39a	41.85±0.24a
	N ₀ PKM ₀	309.1±6.1f	23.76±0.56d	39.22±0.40bc
	N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	292.2±9.4f	23.49±0.61d	38.80±0.54bc

相同肥力土壤同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。N₀P₀K₀M₀、N₀PKM₀、N₁₀PKM₀、N₀PKM₁₀、N₉PKM₁、N₈PKM₂、N₇PKM₃、N₆PKM₄、N₅PKM₅见表3注。

2.3 有机肥部分替代化肥对土壤养分含量的影响

由表5可知,仅施用磷、钾肥能够显著提升高肥力土壤中有效磷和速效钾含量,以及中肥力土壤中

有效磷含量。同时施用氮、磷、钾肥料能够显著增加各肥力土壤中有效磷和有机质含量,显著增加高肥力土壤中速效钾含量、中肥力土壤中速效钾含量和全氮含量,显著降低低肥力土壤 pH。表5还表明,有机氮完全替代化学氮主要影响土壤有效磷含量,对土壤速效钾含量、全氮含量和 pH 无显著影响。进一步分析可知,高肥力土壤中有机氮替代化学氮对土壤有机质含量无显著影响,中、低肥力土壤中有有机氮替代化学氮达到 20% 时能显著增加土壤有机质含量。在低肥力土壤中有有机氮替代 50% 化学氮能显著增加土壤有效磷含量。综合来看,低、中、高肥力土壤中,有机氮替代10%~40%化学氮对土壤有效磷、速效钾、全氮和 pH 无显著影响;在中、低肥力土壤中有有机氮替代20%~50%化学氮能显著增加土壤有机质含量。

2.4 相关性分析

不同肥力土壤中的小麦产量均受到小麦产量构成和土壤养分含量的影响。相关性分析结果(表6)表明,高、中、低肥力土壤中各处理小麦产量均与有效穗数、穗粒数和千粒质量呈正显著相关。各肥力土壤中,土壤速效钾和有机质含量与小麦产量显著正相关,中肥力土壤中全氮含量与小麦产量显著正相关。高、低肥力土壤中土壤 pH 与小麦产量显著负相关。相关性分析结果(表6)还表明,高肥力土壤中,小麦产量与籽粒和秸秆氮含量极显著正相关;中肥力土壤中,小麦产量与秸秆氮含量、籽粒和秸秆磷含量、秸秆钾含量显著正相关;低肥力土壤中,小麦产量与籽粒和秸秆氮含量、秸秆钾含量显著正相关。各肥力土壤中小麦植株氮吸收量与产量均极显著正相关。

3 讨论

有机肥部分替代化肥能促进作物生长发育,提高产量,改善作物生长的土壤环境。有机氮可以替代化学氮,25%有机氮与75%化学氮配合处理水稻籽粒产量最高,同时氮肥利用率可达到48.6%^[21]。江苏沿海地区商品有机肥替代30%~45%化学氮时小麦产量显著提高,但替代比例超过60%会造成小麦显著减产^[22]。华北平原冬小麦-夏玉米轮作区三年定位研究结果表明,商品有机肥部分替代化肥施用后冬小麦和夏玉米平均产量水平与当地栽培条件下高产水平相当^[23]。也有研究结果表明,汉中盆地

水稻栽培中微生物有机肥替代 20% 化学氮肥有利于改善土壤微生物结构,能够比完全施用化学氮肥处理增产 2.72%^[18]。本研究结果表明,有机氮替代

率 20%~30% 处理与全化学氮肥处理产量无显著差异,说明长江下游平原河网区小麦生产中有机氮替代 20%~30% 化学氮是可行的。

表 5 有机氮替代化学氮对土壤养分和 pH 的影响特征

Table 5 Effects of organic nitrogen replacing chemical nitrogen on soil nutrients and pH

土壤肥力	处理	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	有机质 (g/kg)	pH
高肥力	N ₅ PKM ₅	36.7±1.9ab	139±4a	2.08±0.12a	37.0±2.2a	6.55±0.28a
	N ₆ PKM ₄	33.6±0.9abc	137±3a	1.99±0.12a	36.5±1.9a	6.53±0.22a
	N ₇ PKM ₃	34.5±2.0abc	138±2a	2.11±0.16a	37.2±2.0a	6.41±0.17a
	N ₈ PKM ₂	33.1±1.5abc	136±3a	2.07±0.11a	36.7±2.4a	6.45±0.18a
	N ₉ PKM ₁	32.3±1.7abc	133±4a	2.03±0.10a	33.2±1.9a	6.57±0.14a
	N ₀ PKM ₁₀	37.5±1.9a	139±2a	2.14±0.08a	37.6±1.2a	6.68±0.16a
	N ₁₀ PKM ₀	31.8±1.2bc	135±3a	1.98±0.07a	34.3±1.7a	6.63±0.16a
	N ₀ PKM ₀	30.6±1.2c	133±3a	1.92±0.10a	24.6±0.9b	6.72±0.19a
	N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	25.1±0.3d	122±3b	1.84±0.11a	23.5±1.1b	6.81±0.02a
	N ₅ PKM ₅	28.2±1.4a	87±1ab	1.17±0.05abc	32.1±0.4a	7.67±0.19a
中肥力	N ₆ PKM ₄	23.2±1.4b	85±3ab	1.12±0.05abc	31.8±1.0a	7.70±0.11a
	N ₇ PKM ₃	23.6±1.4ab	88±4a	1.22±0.06a	32.2±0.8a	7.68±0.12a
	N ₈ PKM ₂	24.9±1.4ab	85±3ab	1.18±0.07abc	31.6±1.0a	7.62±0.16a
	N ₉ PKM ₁	20.3±1.2b	83±4ab	1.13±0.08abc	29.1±0.7ab	7.72±0.27a
	N ₀ PKM ₁₀	28.2±1.7a	91±3a	1.32±0.05a	32.4±2.0a	7.68±0.29a
	N ₁₀ PKM ₀	24.7±1.7ab	81±3ab	1.19±0.05ab	27.5±0.9b	7.82±0.46a
	N ₀ PKM ₀	21.2±1.6b	77±3bc	1.01±0.05bc	21.5±1.4c	7.88±0.46a
	N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	15.5±0.7c	68±3c	0.98±0.06c	21.0±1.2c	8.14±0.49a
	N ₅ PKM ₅	19.1±0.6ab	58±4a	1.25±0.04a	24.5±1.4a	7.26±0.18cd
	N ₆ PKM ₄	18.3±0.8abc	60±3a	1.22±0.05ab	23.8±1.4a	7.12±0.09d
低肥力	N ₇ PKM ₃	17.4±0.8abcd	59±3a	1.18±0.05ab	24.6±1.7a	7.37±0.11bcd
	N ₈ PKM ₂	16.6±1.3abcd	56±4a	1.16±0.07ab	24.0±1.4a	7.55±0.07abc
	N ₉ PKM ₁	16.1±1.0bcd	57±2a	1.09±0.06abc	19.4±0.9b	7.42±0.07bcd
	N ₀ PKM ₁₀	19.5±0.9a	61±2a	1.27±0.06a	24.7±1.4a	7.26±0.08cd
	N ₁₀ PKM ₀	15.7±1.1cd	54±4a	1.11±0.08abc	18.9±0.7b	7.31±0.05bcd
	N ₀ PKM ₀	15.1±1.0de	51±2a	1.03±0.07bc	14.2±0.5c	7.64±0.10ab
	N ₀ P ₀ K ₀ M ₀	12.3±0.5e	43±2a	0.92±0.03c	13.8±0.3c	7.82±0.08a

提高肥料利用率是实现化肥减量增效的重要途径之一,可通过提高作物产量和养分吸收量来提高肥料利用效率。有机氮替代 50% 化学氮能够提高玉米的氮素吸收量和氮素利用效率,同时能够促进氮素向玉米籽粒中转移,提高玉米籽粒产量^[15]。有机氮替代 25% 化学氮能够提高水稻氮素吸收累积、

水稻产量及氮肥利用率^[21]。长期适宜的有机氮替代部分化学氮可有效调节氮素积累和转运,提高氮肥利用效率^[24]。肥料三要素中氮素对小麦产量的影响最显著。化学氮肥和有机氮肥配合施用是提高肥料三要素,尤其是氮素吸收的重要原因。因为化肥配施有机肥能够改善土壤微生物区系,构建更为

表6 小麦产量与评价指标相关性分析

Table 6 Correlation analysis of wheat yield and evaluation indicators

指标	小麦产量		
	高等肥力土壤	中等肥力土壤	低等肥力土壤
有效穗数	0.973 **	0.975 **	0.967 **
穗粒数	0.902 **	0.864 **	0.916 **
千粒质量	0.772 **	0.585 **	0.590 **
土壤有效磷含量	0.418	0.422	0.388
土壤速效钾含量	0.479 *	0.577 *	0.544 *
土壤全氮含量	0.359	0.515 *	0.45
土壤有机质含量	0.723 **	0.716 **	0.605 **
土壤 pH	-0.483 *	-0.274	-0.503 *
籽粒氮含量	0.807 **	0.509	0.755 *
秸秆氮含量	0.803 **	0.790 *	0.749 *
籽粒磷含量	0.462	0.687 *	0.583
秸秆磷含量	0.58	0.736 *	0.544
籽粒钾含量	0.093	0.652	0.122
秸秆钾含量	0.430	0.886 *	0.835 *
氮吸收量	0.979 **	0.985 **	0.989 **

* 和 ** 分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。

健康、有益于作物生长发育的土壤微生物生态系统。健康的土壤微生物能够更为有效调控化学氮,促进化学氮更好地被吸收、转化和利用。合理的有机肥与无机配施可以提高养分利用率,在减少化学氮肥用量的同时保证作物产量,降低氮素淋失风险^[25]。土壤基础肥力显著影响作物产量。本研究结果表明,相同量肥料运筹下,高肥力条件下的小麦产量依次高于中肥力和低肥力条件下的小麦产量,施肥对低肥力条件下的小麦产量提升量高于高肥力条件下的小麦产量提升量。低肥力条件下肥料运筹中有机氮替代10%~20%化学氮的小麦相对增产效益高于高肥力条件下小麦相对增产效益,但是有机氮替代率达到30%~50%时呈相反特征。可见,基础地力影响有机氮替代无机氮的适宜比例。有机肥具有营养均衡,养分全面,提高土壤生物多样性和土壤生物学活性,改善土壤理化性质,提高土壤肥力等特性^[26-28],但有机肥养分含量低,肥效缓慢,不能及时满足作物生长所需^[29]。本研究结果表明,有机氮100%替代化学氮会造成小麦减产,说明有机肥在作物肥料运筹中还是有局限性的一面,难以有效契合作物生长过程中对养分吸收的需要。化学肥料能够

有效弥补有机肥的缺陷,提高作物产量。有研究结果表明,有机肥替代部分无机肥可提高土壤中全氮、有效磷、速效钾、有机质含量,改善土壤理化性状、提高作物产量^[30-31]。

本研究结果表明,长江下游平原河网区麦田肥料运筹中,低肥力土壤条件下有机氮替代20%~30%化学氮,高肥力和中肥力土壤条件下有机氮替代10%~30%化学氮较为适宜。

参考文献:

- [1] VASBIEVA M T. Effect of long-term application of organic and mineral fertilizers on the organic carbon content and nitrogen regime of soddy-podzolic soil [J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52 (11):1422-1428.
- [2] REVILLINI D, WILSON G W T, MILLER R M, et al. Plant diversity and fertilizer management shape the belowground microbiome of native grass bioenergy feedstocks [J]. Frontiers in Plant Science, 2019 (10): 1-18.
- [3] 王兴仁,张福锁,张卫峰. 我国粮食安全形势和肥料效应的时空转变——初论化肥对粮食安全的保障作用[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25 (4):1-4.
- [4] 侯萌瑶,张 丽,王知文,等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34 (4):360-367.
- [5] LOGRIECO A, BOTTALICO A, MULE G, et al. Epidemiology of toxigenic fungi and their associated mycotoxins for some mediterranean crops [J]. European Journal of Plant Pathology, 2003, 109 (7):645-667.
- [6] MLIHER J J, OWEN M L, ELLERT B H, et al. Influence of crop residues and nitrogen fertilizer on soil water repellency and soil hydrophobicity under long-term no-till [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2019, 99 (3):334-344.
- [7] ELM I A A, MADRAMOOTOO C, EGEH M, et al. Water and fertilizer nitrogen management to minimize nitrate pollution from a cropped soil in southwestern Quebec, Canada [J]. Water Air & Soil Pollution, 2004, 151 (1/4):117-134.
- [8] HYANG Q, LI F S, WANG M X, et al. Photolysis behavior of herbicide propisochlor in water media and preliminary analysis of photoproducts under different light sources [J]. Journal of Environmental Science & Health Part B, 2006, 41 (3):253-267.
- [9] CHEN A P, SHEN X, SHEN J H. Effect of different proportion of organic fertilizer instead of chemical fertilizer on wheat yield [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58 (7): 32-34.
- [10] LIANG B, HYANG K, FU Y L, et al. Effect of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer in different ratios on growth, yield and quality of fluecured tobacco [J]. Asian Agricultural Research, 2017, 9 (12):43-46,51.
- [11] YU Q G, MA J W, ZOU P, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers plus nitrification inhibitor

- DMPP on nitrogen runoff loss in vegetable soils [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, 22 (1):472-481.
- [12] MI W H, WU L H, MA Q X, et al. Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (12): 103-108.
- [13] GE G F, LI Z J, FAN F L, et al. Soil biological activity and their seasonal variations in response to long-term application of organic and inorganic fertilizers [J]. *Plant & Soil*, 2010, 326 (1/2):31-44.
- [14] BHATTACKARYA R, KUNDU S, PRAKASH V, et al. Sustainability under combined application of mineral and organic fertilizers in a rainfed soybean-wheat system of the Indian Himalayas [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 28 (1):33-46.
- [15] 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[J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (20): 3934-3943.
- [16] 孟琳,张小莉,蒋小芳,等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (2):290-296.
- [17] 谢军红,柴强,李玲玲,等. 有机氮替代无机氮对旱作全膜双垄沟播玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (4):124-131.
- [18] 崔月贞,吴玉红,郝兴顺,等. 不同有机氮替代部分无机氮对水稻产量及土壤微生物的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28 (10):1689-1697.
- [19] 王一鸣,赖朝圆,张汉卿,等. 有机氮替代部分无机氮对香蕉生产和土壤性状的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 (5):879-887.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [21] 欧杨虹,徐阳春,沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2009, 25 (1):106-111.
- [22] 徐汉亿,周祥,孙进,等. 施用商品有机肥对沿海地区小麦产量及耕地质量的影响[J]. *大麦与谷类科学*, 2019, 36 (6):34-37.
- [23] 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[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (11):2136-2142.
- [24] 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (2):318-325.
- [25] 井永苹,李彦,薄录吉,等. 有机肥部分替代化肥对作物产量及土壤氮素迁移的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51 (7): 48-54.
- [26] 张奇,张振华,刘丽珠,等. 增施有机肥对黄泛冲积区贫瘠土壤养分和玉米产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (17): 271-276.
- [27] 贺丽群,张庆金,吴培栋,等. 有机肥与生物炭互作对城市底土肥力及生菜生长的影响[J]. *南方农业学报*, 2019, 50 (8): 1701-1708.
- [28] 燕金锐,律其鑫,高增平,等. 有机肥与生物炭对沙化土壤理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47 (9):303-307.
- [29] 邹原东,范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2013, 29 (3):12-16.
- [30] 邢鹏飞,高圣超,马鸣超,等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(3):98-104.
- [31] 祝英,王治业,彭铁楠,等. 有机肥替代部分化肥对土壤肥力和微生物特征的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46 (5):1161-1167.

(责任编辑:陈海霞)