

不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究

张晶¹, 张定一¹, 王丽², 毛平平², 赵娟³, 王姣爱^{1*}

(1 山西省农科院小麦研究所, 山西临汾 041000; 2 山西师范大学, 山西临汾 041000;

3 临汾市气象局, 山西临汾 041000)

摘要:【目的】有机无机肥配施可为作物提供更全面的养分, 改善光合性能而提高产量。为进一步挖掘旱地小麦的增产潜力, 2012~2014年, 在山西省临汾市丘陵旱地开展了有机肥与氮磷配施对小麦增产效果与机理的研究。【方法】通过田间裂区设计, 有机肥为主区, 设施羊粪 22.5 t/hm² (M_s)、猪粪 22.5 t/hm² (M_p)、精制有机肥 2.25 t/hm² (M_o); 氮磷配施量为副区, 设不施氮、磷肥 (N₀P₀), N 105 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm² (N₁₀₅P₇₅)、N 150 kg/hm²、P₂O₅ 105 kg/hm² (N₁₅₀P₁₀₅)。供试小麦品种‘晋麦 92 号’, 生育期测定旗叶 SPAD 相对值、籽粒灌浆参数、干物质积累和收获期籽粒产量。【结果】有机肥与氮磷配施均使小麦灌浆后期 SPAD 相对值下降缓慢。单施有机肥时, 猪粪使小麦灌浆中期 SPAD 相对值和平均灌浆速率最高, 精制有机肥使灌浆后期 SPAD 相对值最高, 灌浆持续期延长最多, 茎叶转移量和穗部积累量最高。有机肥与氮磷配施时, M_sN₁₅₀P₁₀₅、M_pN₁₀₅P₇₅、M_oN₁₀₅P₇₅ 有利于提高旗叶后期 SPAD 相对值, 延长灌浆持续期, 使干物质积累量增加。有机肥与氮磷配施较单施有机肥成穗数和千粒重提高, 产量增加, 以 M_sN₁₅₀P₁₀₅ 产量最高, 其次是 M_pN₁₀₅P₇₅, 二者间差异不显著。【结论】山西南部丘陵旱地小麦有机肥与适量化肥配施, 使成穗数增加, 并可以改善光合特性, 延长灌浆持续期, 增加千粒重实现增产。本研究中, 施羊粪 22.5 t/hm² 时, 配施纯 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 105 kg/hm² 的增产效果最好, 施猪粪 22.5 t/hm² 时, 配施纯 N 105 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm² 可实现减施高产。

关键词: 有机肥; 氮磷肥; 旱地小麦; 增产效果

The mechanism of different combinations of organic and N, P fertilizers increasing yield of dryland wheat

ZHANG Jing¹, ZHANG Ding-yi¹, WANG Li², MAO Ping-ping², ZHAO Juan³, WANG Jiao-ai^{1*}

(1 Institute of Wheat Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen, Shanxi 041000, China;

2 Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China; 3 Weather Bureau of Linfen, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: 【Objectives】 Combined application of organic and inorganic fertilizer can provide enough nutrient to crops to increase production. In order to dig into yield potential in dryland wheat, effects of combined application of organic and N, P fertilizers on yield increasing and mechanism of hilly dryland wheat were studied in Linfen City, Shanxi Province from 2012 to 2014. 【Methods】 A randomized block design with a split plot experiment was laid out and three kinds of organic fertilizer, 22.5 t/hm² of pig manure (M_p), 22.5 t/hm² of sheep manure (M_s) and 2.25 t/hm² of refined organic fertilizer (M_o), were used as the main plot factors. Four N, P fertilizers rates were set as sub plots: N₀P₀, N₁₀₅P₇₅, N₁₅₀P₁₀₅, and CK. The SPAD value of flag leaf, grain-filling characteristics, dry matter accumulation and yield of the Jinmai 92 were tested. 【Results】 The SPAD value of organic and N, P fertilizers decreased slowly in the late sage of seed filling. The SPAD value and average rate of the middle stage of filling was the highest in single pig manure. The SPAD value of the late stage of filling, grain filling duration, stem leaf transferring and amount of spike were the highest in single refined organic fertilizer. The SPAD value,

收稿日期: 2016-05-17 接受日期: 2016-09-07

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-03-07); 国家科技支撑计划 (2015BAD22B03-03); 省科技攻关项目 (20130311008-3) 资助。

作者简介: 张晶 (1984—), 女, 山西襄汾人, 硕士, 助理研究员, 主要从事小麦生理栽培研究。E-mail: zhangjing3298@163.com

* 通信作者 E-mail: wangjiaoai6226@163.com

grain filling duration, dry matter accumulation were improved in $M_S N_{150} P_{105}$, $M_P N_{105} P_{75}$ and $M_O N_{105} P_{75}$. The number of ears, 1000-grain weight and yield of organic and N, P fertilizers were higher than those single organic fertilizer. The yield of $M_S N_{150} P_{105}$ was the highest and had no significant difference with $M_P N_{105} P_{75}$. 【 Conclusion 】 Organic fertilizer with a suitable amount of chemical fertilizer, increase panicles, and could improve the photosynthetic characteristics, extend the filling duration, increase grain production in hilly dryland of Shanxi, yield increasing effect was the best in 22.5 t/hm² of sheep manure combining N 150 kg/hm² and P₂O₅ 105 kg/hm², 22.5 t/hm² of pig manure combining N 105 kg/hm² and P₂O₅ 75 kg/hm² could reduce fertilizer application and increase production.

Key words: organic fertilizer; N, P fertilizers; dryland wheat; yield increasing

我国传统农业生产是施用有机肥培肥地力, 种植农作物。随着农业生产的迅速发展, 化肥用量日益增加, 甚至完全取代了有机肥。过量施用化肥造成土壤质量变差、肥料利用率低、生产成本高及农业水土环境污染等一系列问题^[1-3]。有机无机肥配施可使土壤微生物获得充足的碳氮源, 改善土壤供氮特性, 提高氮肥利用效率^[4-6]。适量的有机无机肥配施可以保持微量营养元素平衡, 有效降低重金属污染风险, 实现农业可持续发展^[7-8]。有机无机肥配施时, 化肥肥效迅速, 主要在开花前促进分蘖; 有机肥肥效持久, 可延长叶片功能期和灌浆进程, 有利于后期干物质的积累和转运^[9-11]。为充分利用农牧业有机废弃物和有机肥, 提高化肥利用效率, 培肥地力^[12-15], 通过连续两年田间试验, 研究了有机肥与氮磷配施对旱地小麦旗叶光合性能、籽粒灌浆特性、干物质积累及产量的影响, 旨在为山西省南部丘陵旱地实现小麦高产高效栽培提供适宜的有机肥与氮磷配施量。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012~2014 年在山西省临汾市尧都区大阳镇岳壁村同一块试验田连续进行。试验地土壤为石灰性褐土, 质地中壤, 位于北纬 36°5.520', 东经 111°45.727', 海拔 693.5 m, 年均气温 12.6℃, 年降水量 430~550 mm。连续 2 年试验数据趋势基本一致, 本文以 2013~2014 年试验数据进行分析。本年度小麦生育期有效降水量 232.1 mm。耕层土壤理化性状为有机质 9.08 g/kg、碱解氮 48.33 mg/kg、速效磷 12.44 mg/kg、速效钾 128 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验采用裂区设计, 有机肥为主区, 设施羊粪 22.5 t/hm² (M_S)、猪粪 22.5 t/hm² (M_P)、精制有机肥 2.25 t/hm² (M_O) 处理, 供试有机肥养分含量见表 1;

氮、磷配施量为副区, 设不施氮、磷肥 ($N_0 P_0$), N 105 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm² ($N_{105} P_{75}$), N 150 kg/hm²、P₂O₅ 105 kg/hm² ($N_{150} P_{105}$), 以及不施肥对照处理 (CK), 共 10 个处理, 每处理 3 个重复。供试品种为‘晋麦 92 号’, 9 月 28 日播种, 播量 150 kg/hm², 6 月 5 日收获, 田间管理和病虫害防治同当地高产麦田。

表 1 供试有机肥养分含量 (g/kg)

Table 1 Nutrient content of tested organic fertilizer

有机肥 Organic materials	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
羊粪 Sheep manure (M_S)	188.79	26.67	28.11	13.69
猪粪 Pig manure (M_P)	179.62	23.93	22.47	11.80
精制有机肥 Commercial organic fertilizer (M_O)	505.37	26.19	23.34	15.51

1.3 测定项目与方法

1.3.1 SPAD 相对值 采用日本 SPAD-502 型叶绿素计测定叶片的 SPAD 相对值。从花后 7 d 开始, 每 7 d 上午 9 点随机选取长势、朝向和大小基本相同的旗叶, 每小区测定 20 片, 取平均值。

1.3.2 籽粒灌浆特性 初花期每个小区标记长势一致且同一天开花的 100 穗, 在开花 7 d 后每隔 5 d 取 10 穗, 将每穗剥出, 统计数目后烘干称重。用 Logistic 方程 $Y = K / (1 + e^{a-bt})$ 拟合籽粒千粒重 (Y) 随开花后天数 (t) 的变化规律。式中, K 为千粒重潜力值; a 和 b 为参数。对该方程求一阶和二阶导数得灌浆速率方程和次级灌浆参数。参数包括 T 灌浆持续天数 (d); R 平均灌浆速率 (g/d); R_{max} 最大灌浆速率 (g/d); T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示渐、快和缓增期灌浆持续时间 (d); R_1 、 R_2 、 R_3 分别表示渐、快和缓增期平均灌浆速率 (g/d)。

1.3.3 干物质积累量 各小区在定点调查样方外,于开花期、灌浆期、成熟期随机选取代表性植株 20 个单茎装入密封塑料袋,带回室内将植株按茎叶、穗部分开,在 105℃ 烘箱内杀青 30 min 后,80℃ 烘至恒重称干重。

1.3.4 产量和产量构成因素 收获当天在各小区 2 个调查样方中的 1 个内随机拔取行长 20 cm 全部植株,随机取 5 株,去除穗粒数小于 5 粒穗数后,准确计数有效成穗数,并调查每穗粒数,求平均值为穗粒数;各处理收获 2 个未取样调查样方外,再随机取 3 个 1.0 m²,脱粒,风干后称重;数取 500 粒称重,换算成千粒重,2 次重复(重复间相差≤0.5 g),80℃ 下烘至恒重,计算籽粒风干含水率,按 13% 含水率计算千粒重和产量。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 和 DPS 软件进行分析。

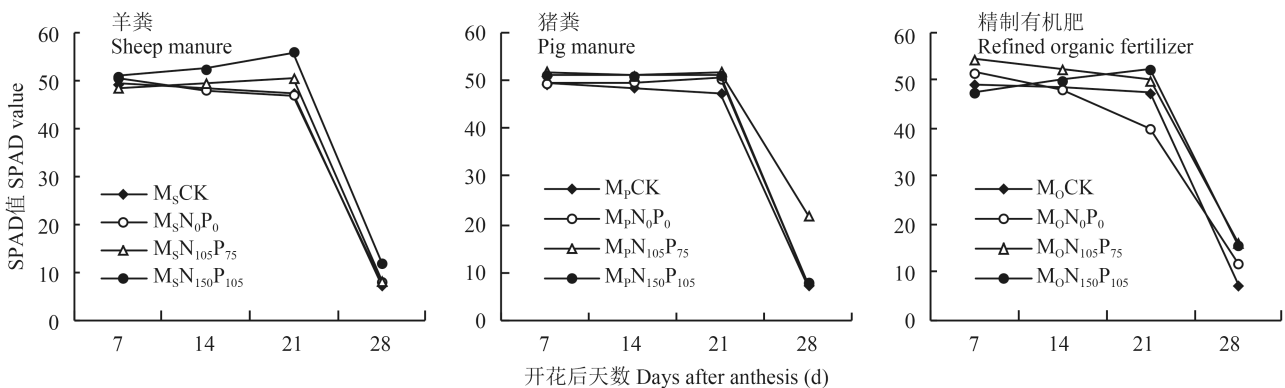


图 1 不同有机肥与氮磷配施处理小麦的 SPAD 相对值

Fig. 1 The SPAD of leaves in wheat affected by different fertilizer combination

2.2 有机肥与氮磷配施对旱地小麦籽粒灌浆特性的影响

用 Logistic 方程对有机肥与氮磷配施籽粒灌浆进程进行拟合,千粒重(Y)与花后天数(t)的拟合方程见表 2,各方程的决定系数在 0.990~0.999 之间,拟合度高,说明方程可以客观反映有机肥与氮磷配施对小麦品种籽粒灌浆进程的影响。单施有机肥时,精制有机肥灌浆持续时间(T)最长,猪粪平均灌浆速率(R)和最大灌浆速率(R_{max})最高。羊粪与氮磷配施 T 随氮磷肥施用量增加而升高,R 和 R_{max} 则降低,N₁₅₀P₁₀₅ 处理小麦快增期、缓增期持续天数(T₂、T₃)及灌浆速率(R₁、R₂、R₃)均最高;猪粪、精制有机肥与氮磷配施 T 随氮磷肥施用量增加先升高后降低,R 和 R_{max} 则相反,N₁₀₅P₇₅ 灌浆各时期持续天数(T₁、T₂、T₃)均最高。

2 结果与分析

2.1 有机肥与氮磷配施对旱地小麦旗叶 SPAD 相对值的影响

由图 1 知,有机肥与氮磷配施花后 28 d 旗叶 SPAD 相对值均高于 CK。单施猪粪 7~21 d 旗叶 SPAD 相对值最高,单施精制有机肥 21~28 d 旗叶 SPAD 相对值最高。羊粪与氮磷配施花后旗叶 SPAD 相对值持续升高,21 d 最高,随后下降,其中羊粪与 N₁₅₀P₁₀₅ 配施(M_SN₁₅₀P₁₀₅)灌浆期旗叶 SPAD 相对值均高于羊粪其他处理。猪粪与氮磷配施花后 7~21 d 旗叶 SPAD 相对值比较稳定,花后 28 d 猪粪与 N₁₀₅P₇₅ 配施(M_PN₁₀₅P₇₅) SPAD 相对值高于猪粪其他处理。精制有机肥与 N₁₀₅P₇₅ 配施旗叶 SPAD 相对值随生育期推迟而下降,N₁₅₀P₁₀₅ 先升后降,花后 28 d 精制有机肥与 N₁₀₅P₇₅ 配施(M_ON₁₀₅P₇₅) SPAD 相对值高于精制有机肥其他处理。

2.3 有机肥与氮磷配施对旱地小麦干物质积累和转运的影响

由表 3 知,有机肥与氮磷配施总干物质积累量均高于 CK。单施有机肥时,精制有机肥茎叶转运量和穗部积累量最高。羊粪与氮磷配施茎叶干物质转运量随氮磷肥施用量增加先升高后降低,穗部和总干物质积累量随氮磷肥施用量增加而增加,以 N₁₅₀P₁₀₅ 最高;猪粪、精制有机肥与氮磷配施茎叶干物质转运量随氮磷肥施用量增加先降低后提高,穗部干物质和总积累量则相反,以 N₁₀₅P₇₅ 最高。

2.4 有机肥与氮磷配施对旱地小麦产量及其构成的影响

由表 4 知,产量以有机肥与氮磷配施高于单施有机肥,单施有机肥高于对照。不同有机肥单施处理的产量差异不显著。羊粪与氮磷配施成穗数、穗

表 2 不同有机肥与氮磷配施小麦籽粒灌浆进程曲线模拟参数

Table 2 Curvilinear equation of accumulation and grain filling parameters in wheat affected by different fertilizer combinations

处理 Treatment	拟合方程 Treatment equations	R^2	T_1	R_1	T_2	R_2	T_3	R_3	T	R	R_{max}
$M_S N_0 P_0$	$Y = 40.6328 / (1 + e^{4.6794 - 0.21337 t})$	0.9980	15.76	0.54	12.34	0.38	15.36	0.52	43.47	0.93	2.17
$M_S N_{105} P_{75}$	$Y = 40.5410 / (1 + e^{4.7488 - 0.21322 t})$	0.9989	16.10	0.53	12.35	0.35	15.37	0.49	43.82	0.93	2.16
$M_S N_{150} P_{105}$	$Y = 40.1050 / (1 + e^{4.4124 - 0.1967 t})$	0.9993	15.74	0.54	13.39	0.43	16.67	0.59	45.79	0.88	1.97
$M_P N_0 P_0$	$Y = 40.0073 / (1 + e^{4.6919 - 0.21794 t})$	0.9993	12.41	0.68	9.69	0.47	12.05	0.65	34.15	1.17	2.72
$M_P N_{105} P_{75}$	$Y = 38.2088 / (1 + e^{4.5288 - 0.2058 t})$	0.9971	15.61	0.52	12.80	0.39	15.93	0.53	44.33	0.86	1.97
$M_P N_{150} P_{105}$	$Y = 37.4613 / (1 + e^{4.9426 - 0.24339 t})$	0.9994	14.99	0.53	10.82	0.31	13.47	0.43	39.28	0.95	2.28
$M_O N_0 P_0$	$Y = 38.9552 / (1 + e^{4.4435 - 0.20411 t})$	0.9999	15.32	0.54	12.90	0.42	16.06	0.58	44.28	0.88	1.99
$M_O N_{105} P_{75}$	$Y = 40.5695 / (1 + e^{4.4001 - 0.19111 t})$	0.9996	16.13	0.53	13.78	0.43	17.15	0.58	47.07	0.86	1.94
$M_O N_{150} P_{105}$	$Y = 38.1890 / (1 + e^{4.5271 - 0.2122 t})$	0.9973	15.13	0.53	12.41	0.40	15.45	0.55	42.99	0.89	2.03
CK	$Y = 36.5566 / (1 + e^{4.9642 - 0.23982 t})$	0.9999	15.21	0.51	10.98	0.30	13.67	0.42	39.86	0.92	2.19

表 3 不同有机肥与氮磷配施小麦的干物质积累和转运量 (g/plant)

Table 3 Accumulation and translocation of dry matter in wheat affected by different fertilizer combinations

处理 Treatment	茎叶 Shoot			穗部 Spike			总积累量 Total dry weight
	灌浆初期 Early filling stage	收获期 Mature stage	转运量 Transferring	灌浆初期 Early filling stage	收获期 Mature stage	转运量 Transferring	
$M_S N_0 P_0$	1.760	1.500	-0.260	0.371	2.067	1.696	1.436
$M_S N_{105} P_{75}$	1.781	1.519	-0.262	0.346	2.196	1.850	1.588
$M_S N_{150} P_{105}$	1.735	1.504	-0.231	0.345	2.353	2.008	1.777
$M_P N_0 P_0$	1.989	1.486	-0.503	0.384	2.235	1.851	1.348
$M_P N_{105} P_{75}$	1.693	1.427	-0.266	0.341	2.230	1.889	1.623
$M_P N_{150} P_{105}$	1.857	1.500	-0.357	0.394	2.165	1.771	1.414
$M_O N_0 P_0$	2.068	1.479	-0.589	0.415	2.339	1.924	1.335
$M_O N_{105} P_{75}$	1.755	1.518	-0.237	0.340	2.288	1.948	1.711
$M_O N_{150} P_{105}$	1.659	1.405	-0.254	0.351	2.180	1.829	1.575
CK	1.917	1.505	-0.412	0.397	2.140	1.743	1.331

粒数、千粒重及产量均随氮磷施用量增加而升高, 以配施 $N_{150}P_{105}$ 处理最高; 猪粪、精制有机肥与氮磷配施成穗数、千粒重及产量随氮磷施用量增加先升高后降低, 以配施 $N_{105}P_{75}$ 最高, 穗粒数则相反。 $M_S N_{150} P_{105}$ 处理与对照产量差异达极显著水平, $M_P N_{105} P_{75}$ 与对照产量差异达显著水平。

3 讨论与结论

有机无机肥配施能够提高灌浆中后期叶绿素含量, 延缓灌浆后期叶片衰老^[16-19]。本研究表明, 单施有机肥、有机无机配施均能提高小麦灌浆后期 SPAD

相对值, 延缓叶片衰老。单施有机肥处理时, 猪粪在小麦灌浆中期的 SPAD 相对值和平均灌浆速率最高, 这可能与猪粪中速效磷含量相对较高, 磷对籽粒灌浆有促进作用有关。精制有机肥使小麦灌浆后期能维持较高的 SPAD 相对值和灌浆持续天数最长, 这可能与精制有机肥中富含有益微生物, 施入后与土壤微生物形成共生增值关系, 提高土壤中养分有效性, 从而延缓小麦灌浆后期叶片衰老。有机无机肥适量配施, 既有速效养分又有缓效有机养分, 充分发挥各自优势, 既促进分蘖, 又满足小麦后期养分需求, 延缓灌浆后期叶片衰老, 提高叶片

表 4 不同有机肥与氮磷配施小麦的产量及其构成

Table 4 Yield component and yield in wheat affected by different fertilizer combination

处理 Treatment	成穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Spike No.	穗粒数 Grains per ear	千粒重 (g) 1000-grain weight	产量 (kg/hm^2) Yield
$M_S N_0 P_0$	438.36 \pm 4.71 abA	34.0 \pm 4.06 bA	43.12 \pm 0.24 bcABC	6329.4 \pm 502.5 abAB
$M_S N_{105} P_{75}$	475.86 \pm 38.89 abA	38.2 \pm 4.21 abA	43.12 \pm 0.54 bcABC	6432.2 \pm 184.9 abAB
$M_S N_{150} P_{105}$	520.03 \pm 66.00 aA	41.0 \pm 5.0 abA	44.15 \pm 0.53 abABC	6860.8 \pm 209.5 aA
$M_P N_0 P_0$	420.02 \pm 68.36 abA	39.8 \pm 3.70 abA	42.11 \pm 1.50 cBC	6090.1 \pm 279.1 bB
$M_P N_{105} P_{75}$	515.03 \pm 49.50 abA	34.8 \pm 5.22 bA	44.36 \pm 0.38 abAB	6708.9 \pm 387.5 aAB
$M_P N_{150} P_{105}$	448.36 \pm 51.85 abA	43.6 \pm 2.88 aA	43.52 \pm 0.88 abcABC	6389.9 \pm 238.9 abAB
$M_O N_0 P_0$	433.36 \pm 7.08 abA	36.4 \pm 10.50 abA	43.56 \pm 1.00 abcABC	6303.1 \pm 186.7 abAB
$M_O N_{105} P_{75}$	491.69 \pm 16.50 abA	34.4 \pm 7.02 bA	44.97 \pm 1.17 aA	6565.6 \pm 243.6 abAB
$M_O N_{150} P_{105}$	461.89 \pm 28.28 abA	41.4 \pm 8.23 abA	43.44 \pm 0.63 abcABC	6416.2 \pm 118.3 abAB
CK	410.86 \pm 12.96 bA	40.2 \pm 4.76 abA	41.93 \pm 0.81 cC	6020.4 \pm 288.3 bB

注 (Note): 同列数值后不同大、小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平 Values followed by different capital and small letters in the same column mean significant at 1% and 5% levels, respectively.

光合性能^[16]。本研究表明有机肥与氮磷配施时,羊粪与高量氮磷肥配施、猪粪和精制有机肥与低量氮磷肥配施可提高叶片光合能力,有效延长灌浆持续期。

合理肥料运筹可协调花前花后的物质积累,保持源库畅通,促进物质向籽粒中快速转移,对于提高作物产量具有重要意义^[20-22]。本研究表明,有机肥与氮磷配施总干物质积累量均高于单施有机肥和对照,这与有机肥与氮磷配施改善光合性能,延缓旗叶衰老,促进干物质积累与转移有关。

有机肥与氮磷配施产量均高于单施有机肥和对照,这与前人研究结果一致^[23-24]。赵隽等^[16, 25]认为,施用有机肥可提高千粒重,但穗粒数和成穗数降低。本研究表明,单施有机肥和有机肥与氮磷配施使成穗数和千粒重提高,与前人研究结果存在差异,这与施肥量、基础地力不同有关。单施有机肥增产幅度较小,有机肥与氮磷配施增产幅度较大,其中羊粪和高量氮磷肥配施与对照差异极显著、猪粪和低量氮磷肥配施产量与对照差异显著,增产主要与成穗数和千粒重有关。

本研究结果表明,山西南部丘陵旱地小麦在施羊粪 22.5 t/hm² 时,配施纯 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 105 kg/hm² 增产效果最好,在施猪粪 22.5 t/hm² 时,配施纯 N 105 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm² 可实现减施高产。

参 考 文 献:

[1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.

Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273.

[2] 刘杏兰,高宗,刘存寿,等. 有机-无机肥料配施的增产效益及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 138-147.

Liu X L, Gao Z, Liu C S, *et al.* Effect of combined application of organic manure and fertilizers on crop yield and soil fertility in a located experiment[J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(2): 138-147.

[3] 周伯瑜,杨子江. 论有机肥在农业生态系统中的地位和作用[J]. 生态学杂志, 1992, 11(3): 53-55.

Zhou B Y, Yang Z J. Role and function of organic fertilizer in agroecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 1992, 11(3): 53-55.

[4] 朱菜红,董彩霞,沈其荣,徐阳春. 配施有机肥提高化肥氮利用效率的微生物作用机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 282-288.

Zhu C H, Dong C X, Shen Q R, Xu Y C. Microbial mechanism on enhancement of inorganic fertilizer-N use efficiency for combined use of inorganic and organic fertilizers[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 282-288.

[5] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144-152.

Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 144-152.

[6] 张小莉,孟琳,王秋君,等. 不同有机无机复混肥对水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 624-630.

Zhang X L, Meng L, Wang Q J, *et al.* Effects of organic-inorganic mixed fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 624-630.

[7] 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.

Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield

- of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133–3139.
- [8] 孔文杰, 倪吾钟. 有机无机肥配合施用对土壤-水稻系统重金属平衡和稻米重金属含量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(5): 517–523.
- Kong W J, Ni W Z. Effects of integrated fertilization with commercial organic manure and chemical fertilizers on heavy metal balance in soil-rice cropping system[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(5): 517–523.
- [9] 王秋君, 张小莉, 罗 佳, 等. 不同有机无机复混肥对小麦产量、氮效率和土壤微生物多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1003–1009.
- Wang Q J, Zhang X L, Luo J, *et al.* Effects of different organic-inorganic mixed fertilizations on yield of wheat, nitrogen use efficiency and soil microbial diversity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1003–1009.
- [10] 陈 磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 230–235.
- Chen L, Hao M D, Zhang S M, *et al.* Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 230–235.
- [11] 张 睿, 刘党校. 氮磷与有机肥配施对小麦光合作用及产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 543–547.
- Zhang R, Liu D X. Effects of N, P and organic fertilizer on photosynthesis, yield quality of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 543–547.
- [12] 奚振邦, 王寓群, 杨佩珍. 中国现代农业发展中的有机肥问题[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1874–1878.
- Xi Z B, Wang Y Q, Yang P Z. The issue on organic manure in developing modern agriculture in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1874–1878.
- [13] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, *et al.* Effect of intergrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean. [J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110: 115–125.
- [14] 吴成龙, 沈其荣, 夏昭远, 等. 麦稻轮作系统有机无机肥料配施协同氮素转化的机制研究 II. 小麦季残留 ^{15}N 对水稻的有效性分析[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 905–912.
- Wu C L, Shen Q R, Xia Z Y, *et al.* Mechanisms for the increased utilization of fertilizer N under integrated use of inorganic and organic fertilizer in a winter wheat-rice rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 905–912.
- [15] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, *et al.* Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 86–156.
- [16] 赵 隽, 董树婷, 刘 鹏, 等. 有机无机肥长期定位配施对小麦群体光合特性及籽粒产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2362–2370.
- Zhao J, Dong S T, Liu P, *et al.* Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on canopy apparent photosynthesis and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2362–2370.
- [17] 姜 东, 于振文, 许玉敏, 等. 有机无机配合施用对冬小麦根系和旗叶衰老的影响[J]. *土壤学报*, 1999, 36(4): 440–447.
- Jiang D, Yu Z W, Xu Y M, *et al.* Effects of combined application of organic manure and fertilizers on senescences of root and flag leaf in winter wheat [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4): 440–447.
- [18] 李春明, 熊淑萍, 杨颖颖, 等. 不同肥料处理对豫麦49小麦冠层结构与产量性状的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2514–2519.
- Li C M, Xiong S P, Yang Y Y, *et al.* Effects of different fertilizer treatments on canopy architecture and grain yield characteristics of winter wheat-Yumai 49[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2514–2519.
- [19] 路文涛, 贾志宽, 张 鹏, 等. 宁南旱区有机培肥对冬小麦光合特性和水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1066–1074.
- Lu W T, Jia Z K, Zhang P, *et al.* Effects of organic fertilization on winter wheat photosynthetic characteristics and water use efficiency in semi-arid areas of southern Ningxia[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1066–1074.
- [20] 李朝苏, 汤永禄, 吴 春, 等. 施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 873–883.
- Li C S, Tang Y L, Wu C, *et al.* Effect of N rate on growth and grain filling of wheat in Sichuan Basin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 873–883.
- [21] 吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 5128–5137.
- Wu G L, Guo L Y, Cui Z Y, *et al.* Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5128–5137.
- [22] 范仲学, 王志芬, 张风云, 等. 有机肥对济旱197开花后营养体内同化物积累转运及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2001, 21(4): 72–75.
- Fan Z X, Wang Z F, Zhang F Y, *et al.* Effects of manure on accumulation and transfer of assimilate in Jihan197 after anthesis and yield[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(4): 72–75.
- [23] 郁 洁, 蒋 益, 徐春森, 等. 不同有机物及其堆肥与化肥配施对小麦生长及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1293–1302.
- Yu J, Jiang Y, Xu C M, *et al.* Effect of combined application of inorganic fertilizer with straw and pig slurry and their compost on wheat growth and nitrogen uptake [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1293–1302.
- [24] 刘益仁, 李 想, 郁 洁, 等. 有机无机肥配施提高麦-稻轮作系统中水稻氮肥利用率机制[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 81–86.
- Liu Y R, Li X, Yu J, *et al.* Mechanisms for the increased fertilizer nitrogen use efficiency of rice in wheat-rice rotation system under combined application of inorganic and organic fertilizers[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 81–86.
- [25] 刘高洁. 长期施肥对麦玉两熟作物光合和保护酶活性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2010.
- Liu G J. Effects of long-term fertilization on crop photosynthesis and protective enzyme activities under wheat-maize double-cropping system [D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.