

雷之萌, 韩 上, 武 际, 等. 淮北砂姜黑土区氮钾配施对小麦产量及氮、钾养分吸收利用的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 161-167.
LEI Zhi-meng, HAN Shang, WU Ji, et al. Effects of Combined Application of Nitrogen and Potassium on Yield and Nutrient Accumulation of Wheat in Huaibei Lime Concretion Black Soil Area, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2): 161-167.

淮北砂姜黑土区氮钾配施对小麦产量及氮、钾养分吸收利用的影响

雷之萌¹, 韩 上², 武 际^{2*}, 朱 林¹, 汪建来², 何贤芳²

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2.安徽省农业科学院作物研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 为给淮北砂姜黑土区小麦生产中氮、钾肥的科学施用提供理论与技术依据, 采用田间试验研究了不同氮、钾水平(N: 180、240、300、360 kg·hm⁻²; K: 90、135、180 kg·hm⁻²)对小麦产量、氮钾养分吸收利用以及肥料效益的影响。结果表明: (1) N₂₄₀K₁₈₀处理下小麦产量为 7 686 kg·hm⁻², 比低氮低钾(N₁₈₀K₉₀)处理的小麦产量显著提高 7.24%, 与高氮高钾(N₃₆₀K₁₈₀)处理的小麦产量无显著性差异; (2) 氮、钾肥配比施用两者存在正交互作用, 该交互作用与小麦产量呈极显著正相关, 对产量的贡献率为 14.06%, 且提高了氮、钾肥的偏生产力; (3) 与低氮低钾(N₁₈₀K₉₀)处理相比, N₂₄₀K₁₈₀处理下小麦植株体内氮、钾素含量分别提高 14.67%和 29.53%。综合考虑小麦产量和肥料效益, 本研究条件下淮北砂姜黑土区适宜的氮(N)、钾(K₂O)肥施用量分别为 240 kg·hm⁻²和 180 kg·hm⁻²。

关键词: 氮钾配施; 小麦; 产量; 养分吸收; 肥料效益

中图分类号: S147.21

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)02-0161-07

doi: 10.13254/j.jare.2016.0248

Effects of Combined Application of Nitrogen and Potassium on Yield and Nutrient Accumulation of Wheat in Huaibei Lime Concretion Black Soil Area, China

LEI Zhi-meng¹, HAN Shang², WU Ji^{2*}, ZHU Lin¹, WANG Jian-lai², HE Xian-fang²

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To provide theoretical and technical basis for the scientific application of nitrogen(N) and potassium(K) fertilizer in wheat cropping in Huaibei lime concretion black soil area, a field experiment was performed to study the effects of different N and K treatments (N: 180, 240, 300, 360 kg·hm⁻²; K: 90, 135, 180 kg·hm⁻²) on wheat yields, absorption of N and K, and fertilizer benefits. The results showed that: (1) The wheat yield under application of N₂₄₀K₁₈₀ reached 7 686 kg·hm⁻², which was significantly increased by 7.24% comparing with that under N₁₈₀K₉₀, and there was no significant differences between the yields under N₂₄₀K₁₈₀ and N₃₆₀K₁₈₀; (2) Compared with the contents of N and K in wheat under N₁₈₀K₉₀, those under N₂₄₀K₁₈₀ were significantly increased by 14.67% and 29.53%, respectively; (3) There was a positive interaction between the application of N and K fertilizer, and the interaction was significantly correlated with wheat yield at a contribution rate of 14.06%, which consequently increased the partial productivities of N and K fertilizer. Considering wheat yield and fertilizer benefit, the optimum application amounts of N and K₂O fertilizer were 240 kg·hm⁻² and 180 kg·hm⁻² in Huaibei lime concretion black soil area.

Keywords: combined application of N and K; wheat; yield; nutrient absorption; fertilizer benefit

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503122); 安徽省农业科学院院长青年创新基金项目(16B1019); 安徽省小麦产业技术体系项目

作者简介: 雷之萌(1992—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事秸秆还田方面的研究。E-mail: leizhimeng1992@163.com

* 通信作者: 武 际 E-mail: wuji338@163.com

在小麦栽培调控措施中,矿质营养的合理配比在肥料运筹中起重要作用,是提高小麦产量、改善小麦品质的重要措施^[1-2]。氮、钾是影响小麦产量和品质的两个关键因子,氮肥施用能有效提高小麦产量,促进小麦对氮素的吸收转化,提升小麦蛋白质含量^[3-7];钾肥对小麦高产、优质和抗倒伏有着举足轻重的作用^[8-9]。诸多研究表明单施氮肥或者钾肥均能在一定程度上提高小麦籽粒产量,但将两者合理配施能更有效地发挥氮、钾肥肥效之间的正交互作用^[10-12]。据统计,近年来安徽省小麦生产发展较快,2015 年小麦播种面积为 245 万 hm^2 ,其中淮北砂姜黑土地区约占 57%^[13]。随着高产作物品种种植面积扩大,氮、钾肥施用量的逐渐增加以及有机肥投入的减少,使得氮、钾等养分的过量供应与不合理的肥料运筹现象日益增多,这在一定程度上限制了作物产量的提高,而且降低了肥料利用效率,加大了肥料的投入成本,影响了经济效益^[14-15]。为此,本课题在安徽省淮北砂姜黑土区开展研究,比较不同氮钾肥配比对小麦产量、氮钾累积量以及肥料效益的影响,为指导淮北砂姜黑土区小麦的合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2014 年 10 月至 2015 年 6 月在安徽省涡阳县进行。供试土壤为砂姜黑土,0~20 cm 土层基本理化性质为:有机质 $21.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $66.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $7.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $254.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 8.16。

1.2 试验设计

试验设 4 个氮水平:180、240、300、360 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;3 个钾水平:90、135、180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。共 12 个处理,分别记作 $\text{N}_{180} \text{K}_{90}$ 、 $\text{N}_{180} \text{K}_{135}$ 、 $\text{N}_{180} \text{K}_{180}$ 、 $\text{N}_{240} \text{K}_{90}$ 、 $\text{N}_{240} \text{K}_{135}$ 、 $\text{N}_{240} \text{K}_{180}$ 、 $\text{N}_{300} \text{K}_{90}$ 、 $\text{N}_{300} \text{K}_{135}$ 、 $\text{N}_{300} \text{K}_{180}$ 、 $\text{N}_{360} \text{K}_{90}$ 、 $\text{N}_{360} \text{K}_{135}$ 、 $\text{N}_{360} \text{K}_{180}$ 。60%氮肥、全部磷肥钾肥作基肥施用,40%氮肥于拔节期追施,各处理磷肥用量均为 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。供试肥料分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)、氯化钾(含 K_2O 60%)。小区面积 30 m^2 ,重复 3 次,随机区组排列。在小麦整个生育期内,除施肥外其他管理措施完全相同。收获时实收每小区产量,同时取样进行常规室内考种。

1.3 测定项目及方法

在玉米收获后,采集 0~20 cm 土层土样,采用常规方法测定基本理化性质^[16]。于成熟期采集植株样

品,样品风干磨碎后经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化,半微量开氏法测定全氮含量,钼锑钒比色法测定全磷含量,火焰光度计法测定全钾含量^[16]。

相关指标计算方法:氮肥(钾肥)偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)= 施氮(钾)区产量/施氮(钾)量

籽粒氮(钾)素分配比例(%)= 籽粒氮(钾)素累积量/地上部氮(钾)素累积量 $\times 100\%$

肥料效益($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)= 产值-肥料成本

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据分析和图表处理,SPSS 17.0 软件进行方差分析、多重比较(Duncan)、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 氮钾配施对小麦产量的影响

图 1 的产量结果显示,增施氮、钾肥均能促进小麦产量的提高,但是氮、钾肥单独施用的增产效果有限。施钾量 90 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮肥的增产幅度为 1.03%~7.79%,平均增产幅度为 3.52%(处理 N_{240} 、 N_{300} 、 N_{360} 与 N_{180} 相比,下同);施钾量 135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮肥的增产幅度为 3.09%~7.17%,平均增产幅度为 4.51%;施钾量 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,氮肥的增产幅度为 6.82%~7.35%,平均增产幅度达到了 7.00%,在氮肥用量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时已达显著差异水平($P < 0.05$)。表明随着钾肥用量的增加,氮肥的增产效应越来越明显。施氮量 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,钾肥的增产幅度为 0.38%~0.39%,平均增产幅度为 0.38%(处理 K_{135} 、 K_{180} 与 K_{90} 相比,下同),不同钾肥用量处理间差异不显著;施氮量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,钾肥的增产幅度为 2.42%~6.15%,平均增产幅度为 4.28%;施氮量 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,钾肥的增产幅度为 1.88%~5.42%,平均增产幅度为 3.65%;氮肥用量 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理中,在钾肥用量 180 $\text{kg} \cdot$

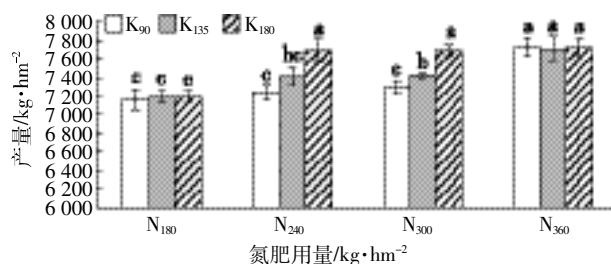


图 1 氮钾配施对小麦产量的影响

Figure 1 Effects of combined application of N and K on wheat yield

hm⁻²时达显著差异水平($P<0.05$);施氮量提高至 360 kg·hm⁻²时,钾肥对小麦产量表现出一定的负效应。说明在一定氮肥用量范围内(<300 kg·hm⁻²),钾肥对小麦的增产效应随着配施氮肥用量的增加也表现出提高的趋势。表 1 结果显示,氮钾交互作用对小麦产量的贡献率为 14.06%,表明合理配施氮钾肥能促进氮、钾两种养分对小麦产量产生极显著正交互作用($P<0.01$),从而最大限度地发挥两种养分的增产效应。

表 2 的结果显示,在同一钾肥用量水平下提高氮肥施用量,氮肥偏生产力随之降低。但是钾肥的合理

配施对氮肥的偏生产力有促进作用。在施氮量 180 kg·hm⁻²时,处理 K₁₃₅、K₁₈₀ 的氮肥偏生产力比 K₉₀ 均提高了 0.38%;在施氮量 240 kg·hm⁻²时,处理 K₁₃₅、K₁₈₀ 的氮肥偏生产力比 K₉₀ 分别提高了 2.42%和 6.17%;在施氮量 300 kg·hm⁻²时,处理 K₁₃₅、K₁₈₀ 的氮肥偏生产力比 K₉₀ 分别提高了 1.85%和 5.39%;在施氮量提高至 360 kg·hm⁻²时,钾肥用量的增加对氮肥偏生产力无明显效应。与氮肥偏生产力相似,在相同氮肥用量水平下,钾肥偏生产力随着钾肥用量提高而降低,但是合理增施氮肥后钾肥的偏生产力表现出增加的趋势。

2.2 氮钾配施对小麦氮素累积量的影响

施用氮、钾肥能够促进小麦植株对氮素养分的吸收。由表 3 可看出,随着氮钾肥用量的增加,小麦地上部、籽粒和秸秆的氮素累积量均随之提高。钾肥用量 90 kg·hm⁻²时,提高氮肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 0.06%~7.76%,平均增幅为 3.91%(处理 N₂₄₀、N₃₀₀、N₃₆₀ 与 N₁₈₀ 相比,下同);钾肥用量 135 kg·hm⁻²时,提高氮肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 2.49%~10.70%,平均增幅为 6.60%;钾肥用量 180 kg·hm⁻²时,提高氮肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 5.44%~14.18%,平均增幅达到了 9.81%,且在氮肥用量 240 kg·hm⁻²时已达显著差异水平($P<0.05$)。即提高氮肥用量对小麦籽粒氮素累积量的增加效应随着钾肥用量的提高而增加。氮肥用量 180 kg·hm⁻²时,提高钾肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 0.21%~1.97%,平均增幅为 1.09%(处理 K₁₃₅、K₁₈₀ 与 K₉₀ 相比,

表 1 氮钾配比对小麦产量的贡献率

Table 1 Contribution rate of N and K to wheat yield

变因	F 值	贡献率/%
施氮量	54.155**	70.27
施钾量	18.164**	15.71
氮钾交互	5.401**	14.06

注:**表示在 1%水平差异显著。

表 2 氮钾配施对氮钾肥偏生产力的影响

Table 2 Effects of combined application of N and K on N and K partial productivity

处理	氮肥偏生产力/kg·kg ⁻¹			钾肥偏生产力/kg·kg ⁻¹		
	K ₉₀	K ₁₃₅	K ₁₈₀	K ₉₀	K ₁₃₅	K ₁₈₀
N ₁₈₀	39.82	39.97	39.97	79.63	53.29	39.97
N ₂₄₀	30.17	30.90	32.03	80.46	54.93	42.70
N ₃₀₀	24.31	24.76	25.62	81.02	55.03	42.71
N ₃₆₀	21.46	21.42	21.46	85.83	57.11	42.91

表 3 氮钾配施对小麦氮素累积量的影响

Table 3 Effects of combined application of N and K on nitrogen accumulation in wheat

处理	氮素累积量/kg·hm ⁻²			氮素分配比例/%	
	籽粒	秸秆	地上部	籽粒	秸秆
N ₁₈₀ K ₉₀	143.62±7.27c	32.65±4.36f	176.27±10.89c	81	19
N ₁₈₀ K ₁₃₅	143.92±6.14c	40.44±9.32e	184.36±15.46c	78	22
N ₁₈₀ K ₁₈₀	146.45±8.52c	43.91±1.83d	190.36±9.13bc	77	23
N ₂₄₀ K ₉₀	143.71±7.13c	36.82±3.01ef	180.53±7.04c	80	20
N ₂₄₀ K ₁₃₅	147.51±4.55c	40.89±3.01e	188.40±1.70bc	78	22
N ₂₄₀ K ₁₈₀	154.42±10.06b	47.71±1.22bc	202.13±9.18b	76	24
N ₃₀₀ K ₉₀	148.69±8.66bc	38.74±6.26ef	187.43±5.39bc	79	21
N ₃₀₀ K ₁₃₅	155.30±9.31b	44.56±13.90cd	199.86±15.63b	78	22
N ₃₀₀ K ₁₈₀	163.00±18.58a	54.95±8.05a	217.95±25.67a	75	25
N ₃₆₀ K ₉₀	154.76±3.03b	46.66±8.00c	201.42±6.67b	77	23
N ₃₆₀ K ₁₃₅	159.32±12.53ab	50.70±19.42b	210.02±23.60ab	76	24
N ₃₆₀ K ₁₈₀	167.22±18.10a	55.88±21.10a	223.10±38.95a	75	25

注:不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。下同。

下同),不同钾肥用量处理间差异不显著;氮肥用量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 $2.64\%\sim 7.45\%$,平均增幅为 5.05% ;氮肥用量 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 $4.45\%\sim 9.62\%$,平均增幅为 7.03% ;氮肥用量 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒氮素累积量的增幅为 $2.95\%\sim 8.05\%$,平均增幅为 5.50% 。氮肥用量 240 、 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理中,相比钾肥用量 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理均在钾肥用量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达显著差异水平($P<0.05$)。即提高钾肥用量对小麦籽粒氮素累积量的增加效应随着合理施用氮肥量的提高而增加。

从氮素分配比例来看,小麦植株吸收的 75% 以上的氮素存储在小麦籽粒中。但是氮、钾肥施用量的提高降低了小麦籽粒氮素累积量所占比例,说明随着氮、钾肥施用量的提高更多的氮素分配到了小麦秸秆中。

2.3 氮钾配施对小麦钾素累积量的影响

施用氮、钾肥能够促进小麦植株对钾素养分的吸收。由表 4 可看出,随着氮钾肥用量的提高,小麦地上部、籽粒和秸秆的钾素累积量均随之增加。钾肥用量 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高氮肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $3.94\%\sim 7.54\%$,平均增幅为 5.74% (处理 N_{240} 、 N_{300} 、 N_{360} 与 N_{180} 相比,下同);钾肥用量 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高氮肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $4.59\%\sim 7.48\%$,平均增幅为 6.03% ;钾肥用量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高氮肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $3.85\%\sim 9.09\%$,平均增幅达到 6.47% ,且在氮肥用

量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达显著差异水平($P<0.05$)。即提高氮肥用量对小麦籽粒钾素累积量的增加效应随着钾肥用量的提高而增加。氮肥用量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $4.22\%\sim 5.73\%$,平均增幅为 4.97% (处理 K_{135} 、 K_{180} 与 K_{90} 相比,下同),不同钾肥用量处理间差异不显著;氮肥用量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $4.88\%\sim 5.63\%$,平均增幅为 5.25% ;氮肥用量 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $4.82\%\sim 8.80\%$,平均增幅为 6.81% ;氮肥用量 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,提高钾肥用量后小麦籽粒钾素累积量的增幅为 $3.58\%\sim 7.24\%$,平均增幅为 5.41% ,相比钾肥用量 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理在钾肥用量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达显著差异水平($P<0.05$)。即提高钾肥用量对小麦籽粒钾素累积量的增加效应随着合理施用氮肥量的提高而增加。

从钾素分配比例来看,小麦植株吸收的 80% 以上的钾素存储在小麦秸秆中。但是氮、钾肥施用量的提高降低了小麦籽粒钾素累积量所占比例,说明随着氮钾肥用量的提高更多的钾素分配到了小麦秸秆中。

2.4 氮钾配施对小麦肥料效益的影响

不同氮钾配比处理间的小麦产值、肥料成本和肥料效益存在差异(表 5)。施氮量 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平下的 3 个处理中,小麦产值均在 $17\ 700\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上,随钾肥用量的提高小麦产值没有明显变化;施氮量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平下小麦产值整体在 $16\ 600\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以下,钾肥用量增加对小麦产值也无明显影响。但在氮肥用量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平时,肥料效

表 4 氮钾配施对小麦钾素累积量的影响

Table 4 Effects of combined application of N and K on potassium accumulation in wheat

处理	钾素累积量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			钾素分配比例/%	
	籽粒	秸秆	地上部	籽粒	秸秆
$N_{180}K_{90}$	$31.96\pm 0.39c$	$141.54\pm 30.68e$	$173.50\pm 31.01d$	18	82
$N_{180}K_{135}$	$33.31\pm 2.56c$	$161.11\pm 27.47d$	$194.42\pm 24.95c$	17	83
$N_{180}K_{180}$	$33.79\pm 3.42c$	$161.71\pm 15.91d$	$195.50\pm 19.18c$	17	83
$N_{240}K_{90}$	$33.22\pm 3.86c$	$146.82\pm 41.89e$	$180.04\pm 45.69d$	18	82
$N_{240}K_{135}$	$34.84\pm 1.06b$	$166.43\pm 8.95cd$	$201.27\pm 9.28bc$	17	83
$N_{240}K_{180}$	$35.09\pm 0.90b$	$189.64\pm 24.69b$	$224.73\pm 24.63ab$	16	84
$N_{300}K_{90}$	$33.62\pm 4.97c$	$152.19\pm 44.62de$	$185.81\pm 48.21cd$	18	82
$N_{300}K_{135}$	$35.24\pm 4.41b$	$172.21\pm 10.01c$	$207.45\pm 14.05bc$	17	83
$N_{300}K_{180}$	$36.58\pm 3.47a$	$189.94\pm 25.45b$	$226.22\pm 23.67a$	16	84
$N_{360}K_{90}$	$34.37\pm 0.21b$	$160.29\pm 19.71d$	$194.66\pm 19.83c$	18	82
$N_{360}K_{135}$	$35.60\pm 4.77ab$	$186.94\pm 19.29b$	$222.54\pm 19.52ab$	16	84
$N_{360}K_{180}$	$35.86\pm 1.46a$	$199.67\pm 21.04a$	$226.53\pm 22.49a$	15	85

表5 氮钾配施对小麦肥料效益的影响(元·hm⁻²)

Table 5 Effects of combined application of N and K on economic benefit(yuan·hm⁻²)

处理	产值	肥料成本	肥料效益
N ₁₈₀ K ₉₀	16 484±241c	1 854	14 629±241bc
N ₁₈₀ K ₁₃₅	16 545±145c	2 106	14 439±145bcd
N ₁₈₀ K ₁₈₀	16 549±155c	2 358	14 191±155d
N ₂₄₀ K ₉₀	16 654±181c	2 154	14 500±181bcd
N ₂₄₀ K ₁₃₅	17 057±221bc	2 406	14 650±221abc
N ₂₄₀ K ₁₈₀	17 677±276a	2 658	15 019±276a
N ₃₀₀ K ₉₀	16 772±161c	2 454	14 318±161cd
N ₃₀₀ K ₁₃₅	17 086±66b	2 706	14 380±66bcd
N ₃₀₀ K ₁₈₀	17 680±148a	2 958	14 722±148ab
N ₃₆₀ K ₉₀	17 768±231a	2 754	15 014±231a
N ₃₆₀ K ₁₃₅	17 732±296a	3 006	14 726±296ab
N ₃₆₀ K ₁₈₀	17 765±225a	3 258	14 506±225bcd

注:小麦以2.30元·kg⁻¹计;N以5.00元·kg⁻¹计;P₂O₅以5.00元·kg⁻¹计;K₂O以5.60元·kg⁻¹计。

益随钾肥用量的增加(K₁₈₀与K₉₀相比)而降低,并达显著差异水平;氮肥用量240 kg·hm⁻²和300 kg·hm⁻²水平下,小麦产值随钾肥用量的增加而提高,均在K₁₈₀水平下达最大值,且肥料效益随钾肥用量的增加而上升,差异水平显著(P<0.05)。扣除肥料成本后,N₂₄₀K₁₈₀处理小麦肥料效益最好,达15 019元·hm⁻²,且高于N₃₆₀水平下的3个处理。

3 讨论

前人的研究结果显示^[17-22],小麦生产中施氮量与籽粒产量呈抛物线关系,适宜的氮肥用量能够促进小麦根、茎、叶等营养器官的生长发育,增进营养物质的累积,对提高小麦产量有重要作用。氮肥用量过多,不利于营养器官中的氮素向籽粒转移,最终导致产量降低^[23-24]。施钾能够提高小麦开花期叶片含钾量,增强了小麦的光合作用,促进了小麦光合产物向籽粒的运输^[25],进而提高了小麦植株花前氮素的积累和贮存氮素的运转,对增加小麦籽粒蛋白质含量和提高小麦产量有重要意义^[26-28]。而本研究结果显示,在淮北砂姜黑土区种植小麦的施肥处理中,因砂姜黑土黏粒含量高,耕性和通透性能差,有机质、氮、磷含量低^[29],加上农业生产长期以来偏向于施用化学氮肥,影响了作物产量和品质的提高^[30-31],而氮、钾肥配施的效果比单独增施氮或钾肥的增产效果更为明显。氮肥的增产效果随着钾肥用量的提高而增加,当施钾量180 kg·hm⁻²时,氮肥的平均增产幅度达到了7.00%;钾肥的

增产效果也随着氮肥用量的提高而增加,当施氮量240 kg·hm⁻²时,钾肥的平均年增产幅度最大,达4.28%;高氮肥用量处理(N₃₆₀)的产量虽然未降低,但单位N的增产率明显降低。Hirel等^[24]认为,适量施用氮肥能够有效提高作物产量,但一定范围后继续增施氮肥,产量增加率会逐渐降低甚至减产。本试验得出相同结论,即继续增施氮肥,钾肥的增产幅度有降低趋势。因此,在适宜的氮肥用量条件下,氮、钾肥对小麦产量有着极显著正交互作用。合理配施氮、钾肥还提高了氮、钾肥的偏生产力,促进了小麦对氮、钾肥的吸收利用,减少环境污染,这与Cormier等^[32]的研究结果一致。

有研究表明^[2,10,14],氮、钾肥合理配施不但可以显著提高小麦产量,而且还能够促进小麦植株对氮、钾养分的吸收利用。本研究结果进一步验证了前人的研究结论。适宜的氮、钾配比通过养分间的正交互作用显著提高了小麦地上部、籽粒和秸秆的氮、钾素累积量,为小麦高产奠定物质基础。同时,增施氮、钾肥提高了氮、钾素在秸秆中所占的比例,这也为实施秸秆还田、高效利用秸秆养分资源提供了数据支撑。合理增施氮、钾肥虽然增加了肥料的投入,但肥料效益显著。扣除肥料成本后,处理N₂₄₀K₁₈₀获得最高肥料效益15 019元·hm⁻²。综合考虑产量和肥料效益,本试验条件下,以N₂₄₀K₁₈₀为最优氮钾组合。

4 结论

(1)合理配施氮钾肥能够显著提高淮北砂姜黑土区小麦产量。适宜的氮、钾比对小麦产量和养分吸收利用表现出极显著正交互作用,从而显著提高了氮、钾肥的偏生产力。

(2)本研究条件下,淮北砂姜黑土区适宜的氮、钾肥施用量分别为240 kg·hm⁻²和180 kg·hm⁻²。

参考文献:

[1] 闫伟强,唐利娜,朱国梁,等.不同灌水条件下氮钾互作对小麦产量的影响[J].山东农业科学,2013,45(2):90-91,94.
YAN Wei-qiang, TANG Li-na, ZHU Guo-liang, et al. Effect of nitrogen and potassium interaction on yield of wheat under different irrigation conditions[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013,45(2):90-91,94. (in Chinese)
[2] 武际,郭熙盛,王允青,等.不同氮、钾水平对小麦产量和氮、钾养分吸收利用的影响[J].安徽农业科学,2009,37(24):11469-11470,11472.
WU Ji, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of different nitrogen and potassium levels on wheat yield and uptake and utilization of

- nitrogen and potassium nutrients[J]. *Anhui Academy of Agricultural Sciences*, 2009, 37(24): 11469–11470, 11472. (in Chinese)
- [3] 顾焱明, 黄婷苗, 郑险峰, 等. 秸秆还田措施下施氮量对冬小麦产量及养分吸收的影响[J]. 西北农林科技大学学报, 2013, 41(10): 79–87.
GU Chi-ming, HUANG Ting-miao, ZHENG Xian-feng, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on yield and nutrition uptake of winter wheat planted in straw return field[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2013, 41(10): 79–87. (in Chinese)
- [4] 熊淑萍, 王 静, 王小纯, 等. 耕作方式及施氮量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(7): 767–775.
XIONG Shu-ping, WANG Jing, WANG Xiao-chun, et al. Effect of tillage and nitrogen addition rate on nitrogen metabolism, grain yield and protein content in wheat in lime concretion black soil region[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(7): 767–775. (in Chinese)
- [5] 魏凤珍, 李金才, 王成雨, 等. 氮素运筹技术对冬小麦籽粒产量和品质影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 22(1): 26–29.
WEI Feng-zhen, LI Jin-cai, WANG Cheng-yu, et al. Effect of nitrogen application techniques on grain quality and yield in winter wheat[J]. *Journal of Chinese Cereals and Oils Association*, 2006, 22(1): 26–29. (in Chinese)
- [6] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 815–822.
ZHAO Jun-ye, YU Zhen-wen. Effect of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 815–822. (in Chinese)
- [7] 丁锦峰, 黄正金, 成亚梅, 等. 稻茬小麦不同氮肥利用率群体间产量、品质和经济效益的差异[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(2): 251–257.
DING Jin-feng, HUANG Zheng-jin, CHENG Ya-mei, et al. Difference in yield, quality and economic income among wheat populations with different nitrogen utilization rate following rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(2): 251–257. (in Chinese)
- [8] 葛玮健, 常艳丽, 刘俊梅, 等. 土区长期施肥对小麦-玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 629–636.
GE Wei-jian, CHANG Yan-li, LIU Jun-mei, et al. Potassium balance and pool as influence by long-term fertilization under continuous winter wheat-summer maize cropping system in a manural loess soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 629–636. (in Chinese)
- [9] 于振文, 梁晓芳, 李延奇, 等. 施钾量和施钾时期对小麦氮素和钾素吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 69–74.
YU Zhen-wen, LIANG Xiao-fang, LI Yan-qi, et al. Effect of potassium application rate and time on the uptake and utilization of nitrogen and potassium by winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 69–74. (in Chinese)
- [10] 武 际, 郭熙盛, 王允青, 等. 氮钾配施对弱筋小麦氮、钾养分吸收利用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1054–1061.
WU Ji, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effect of combined application of nitrogen and potassium on absorption of N and K, grain yield and quality of weak gluten wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1054–1061. (in Chinese)
- [11] 武 际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同土壤养分状况下氮钾配施对弱筋小麦产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 841–846.
WU Ji, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effect of combined application of nitrogen and potassium on grain yield and quality of weak gluten wheat in soil with different nutrient status[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(5): 841–846. (in Chinese)
- [12] 邹铁祥, 戴廷波, 姜 东, 等. 不同氮、钾水平对弱筋小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 86–90.
ZOU Tie-xiang, DAI Ting-bo, JIANG Dong, et al. Effect of nitrogen and potassium supply on grain yield and quality in weak gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(6): 86–90. (in Chinese)
- [13] 安徽省统计局. 安徽省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
Anhui Provincial Bureau of Statistics. Statistical yearbook of Anhui province[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015. (in Chinese)
- [14] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 687–694.
ZHANG Fu-suo, CUI Zhen-ling, WANG Ji-qing, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687–694. (in Chinese)
- [15] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103.
PENG Shao-bing, HUANG Jian-liang, ZHONG Xu-hua, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1095–1103. (in Chinese)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 265–271.
BAO Shi-tan. Soil agricultural chemistry analysis (Third Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 265–271. (in Chinese)
- [17] 曹 倩, 贺明荣, 代兴龙, 等. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 815–822.
CAO Qian, HE Ming-rong, DAI Xing-long, et al. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 815–822. (in Chinese)
- [18] 李升东, 王法宏, 司纪升, 等. 氮肥管理对小麦产量和氮肥利用效率的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 403–407.
LI Sheng-dong, WANG Fa-hong, SI Ji-sheng, et al. Effects of nitrogen application patterns on yields of winter wheat and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(2): 403–407. (in Chinese)
- [19] 王晓楠, 吴贵玉, 付连双, 等. 氮肥处理对春小麦穗粒数形成阶段的影响[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(4): 32–35.
WANG Xiao-nan, WU Shi-yu, FU Lian-shuang, et al. Effect of nitrogen fertilizer treatment on growth stage of spring wheat kernels per

- spike[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011,42(4):32–35. (in Chinese)
- [20] 刘青林, 张恩和, 王琦, 等. 灌溉与施氮对留茬免耕春小麦耗水规律、产量和水分利用效率的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(5):169–177.
- LIU Qing-lin, ZHANG En-he, WANG Qi, et al. Effect of irrigation and nitrogen supply levels on water consumption, grain yield and water use efficiency of spring wheat on no-tillage with stubble standing farmland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5):169–177. (in Chinese)
- [21] Erisman J W, Galloway J A, Sutton M S, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world [J]. *Nat Geosci*, 2008(1):636–639.
- [22] Löffler C M, Busch R H. Selection for grain protein, grain yield and nitrogen partitioning efficiency in hard red spring wheat[J]. *Crop Science*, 1982, 22(3):592–595.
- [23] 王月福, 姜东, 于振文, 等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(5):513–520.
- WANG Yue-fu, JIANG Dong, YU Zhen-wen, et al. Effect of nitrogen rates on grain yield and protein content of wheat and its physiological basis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(5):513–520. (in Chinese)
- [24] Hirel B, Le Gouis J, Ney B, et al. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: Towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2369–2387.
- [25] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 钾肥运筹对小麦氮素和钾素吸收利用及产量和品质的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(5):777–783.
- WU Ji, GUO Xi-sheng, WANG Yun-qing, et al. Effects of potassium fertilizer operation on uptake and utilization of nitrogen and potassium, yield and quality of wheat[J]. *Soils*, 2008, 40(5):777–783. (in Chinese)
- [26] 邹铁祥, 戴廷波, 姜东, 等. 钾素水平对小麦氮素积累和运转及籽粒蛋白质形成的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(4):686–692.
- ZOU Tie-xiang, DAI Ting-bo, JIANG Dong, et al. Potassium supply affected plant nitrogen accumulation and translocation and grain protein formation in winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4):686–692. (in Chinese)
- [27] 孙丽敏, 李春杰, 何萍, 等. 长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5):1096–1102.
- SUN Li-min, LI Chun-jie, HE Ping, et al. Effects of long-term K application and straw returning on yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5):1096–1102. (in Chinese)
- [28] 何萍, 李玉影, 金继运. 氮钾营养对面包强筋小麦产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(4):395–398.
- HE Ping, LI Yu-ying, JIN Ji-yun. Effects of N and K nutrition on yield and qualities of bread wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4):395–398. (in Chinese)
- [29] 王道中, 花可可, 郭志彬. 长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4781–4789.
- WANG Dao-zhong, HUA Ke-ke, GUO Zhi-bin. Effect of long-term fertilization on crop yield and soil physical properties in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4781–4789. (in Chinese)
- [30] 张效朴. 淮北砂姜黑土的肥力特点与高产高效粮食生产的施肥管理技术研究[J]. *农业现代化研究*, 1996, 17(4):218–224.
- ZHANG Xiao-pu. Study on fertilization management technology of high-yield grain production and soil fertility characteristics in Huaibei lime concretion black soil area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 1996, 17(4):218–224. (in Chinese)
- [31] 李文高. 有机-无机肥料配施培肥砂姜黑土研究[J]. *安徽农业科学*, 2000, 28(5):636–637.
- LI Wen-gao. Study on the combined application of organic and chemical fertilizer for the improvement of lime concretion black soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2000, 28(5):636–637. (in Chinese)
- [32] Cormier F, Faure S, Dubreuil P, et al. A multi-environmental study of recent breeding progress on nitrogen use efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Theor Appl Genet*, 2013, 126(12): 3035–3048.