

网络出版时间:2020-09-27 11:52 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.03.002
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200924.1236.002.html

节水灌溉模式下施肥量对小麦产量和加工品质的影响

吴 强,张永平,谢 岷,高飞雁,赵志伟

(内蒙古农业大学 农学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

【摘 要】【目的】探明河套灌区小麦实现高产、优质、节水相统一的施肥量范围。【方法】以中强筋小麦品种永良 4 号为供试材料,于内蒙古巴彦淖尔市五原县田间进行磷肥、氮肥两因素五水平完全随机区组试验,通过方差分析、相关分析、回归分析,研究节水灌溉模式下施磷量和施氮量对小麦开花期农艺性状、产量及一、二次加工品质的影响,确定该地区小麦节水灌溉模式下优质与高产相统一的施肥量。【结果】小麦开花期多数植株形态指标(茎粗、旗叶长、旗叶宽、旗叶面积、单株叶面积),群体指标(叶面积指数、干物质),光合生理指标(SPAD、净光合速率)随施磷量和施氮量的增加表现为先升高后降低的变化趋势。小麦产量随着施磷量和施氮量的增加均呈先升高后降低的趋势。小麦籽粒的一、二次加工品质均随施氮量的增加呈线性增加趋势,随施磷量的增加呈先升高后降低趋势。施磷量、施氮量及其互作对小麦产量和加工品质影响程度表现为施氮量>施磷量>氮磷互作。小麦籽粒产量与蛋白质含量间存在极显著正相关关系,适当增加施肥量可同步提高小麦的产量和品质。河套灌区小麦节水灌溉模式下优质与高产相统一的施磷(P_2O_5)量为 66.2~72.5 kg/hm²,施氮(纯 N)量为 181.7~193.3 kg/hm²;与农户常规施肥量比较,该施肥模式施磷量减少 44.3%~49.1%,施氮量减少 19.5%~24.3%,产量提高 12.4%,蛋白质产量增加 15.7%。【结论】磷肥和氮肥合理配施有利于小麦产量与品质的协同提高。

【关键词】 小麦栽培;节水灌溉;施肥量;小麦产量;河套灌区

【中图分类号】 S512.162

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2021)03-0009-09

Effects of fertilization on wheat yield and processing quality under water-saving irrigation mode

WU Qiang, ZHANG Yongping, XIE Min, GAO Feiyan, ZHAO Zhiwei

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to explore the fertilizer application rates to obtain high yield, high quality, and water-saving wheat in the Hetao Irrigation District. 【Method】 In Wuyuan County, Bayannur, Inner Mongolia, the medium-strong gluten wheat variety Yongliang 4 was selected for a five-level completely random block test of phosphorus and nitrogen in field. Through variance analysis, correlation analysis and regression analysis, the effects of phosphorus and nitrogen application on agronomic traits at flowering stage, yield, and primary and secondary processing quality of wheat in the water-saving irrigation mode were studied. The amount of fertilization integrated with high quality and high yield under the water-saving irrigation model of wheat in this region was determined. 【Result】 With the increase of phosphorus application rate and nitrogen application rate, most morphological indicators (stalk thickness, flag leaf

【收稿日期】 2020-03-13

【基金项目】 国家重点研发计划项目(2018YFD020040709);国家自然科学基金项目(31560365)

【作者简介】 吴 强(1994—),男,河北保定人,博士,主要从事小麦栽培生理研究。E-mail: imauwq@qq.com

【通信作者】 张永平(1970—),男,内蒙古包头人,教授,博士生导师,主要从事小麦栽培生理研究。E-mail: imauzyp@163.com

length, flag leaf width, flag leaf area and leaf area per plant), group indexes (leaf area index and dry matter), and photosynthetic physiological indexes (SPAD and net photosynthetic rate) of wheat at the flowering stage showed the trend of increasing first and then decreasing. The yield of wheat increased first and then decreased with the increase of phosphorus and nitrogen application. The primary and secondary processing quality of wheat showed a linear increasing trend with the increase of nitrogen application, but it firstly increased and then decreased with the increase of phosphorus application. The effect of phosphorus application, nitrogen application and their interaction on wheat yield and processing quality were in the order of nitrogen application > phosphorus application > nitrogen and phosphorus interaction. There was a very significant positive correlation between wheat grain yield and protein content. Appropriately increasing amount of fertilizer can simultaneously increase wheat yield and quality. Under the water-saving irrigation mode, the recommended high-quality and high-yield phosphorus application (P_2O_5) rate was 66.2—72.5 kg/hm², and the nitrogen application (pure N) rate was 181.7—193.3 kg/hm². Compared with conventional fertilization application of farmers, this fertilization mode reduced phosphorus application by 44.3%—49.1% and nitrogen application reduces by 19.5%—24.3%, while increased yield by 12.4% and protein yield by 15.7%. **【Conclusion】** The rational combination of phosphate fertilizer and nitrogen fertilizer was beneficial to the synergistic improvement of wheat yield and quality.

Key words: wheat cultivation; water-saving irrigation; fertilization application; wheat yield; Hetao Irrigation District

内蒙古河套灌区小麦常年播种面积占当地粮食作物总播种面积的 50% 以上^[1]。长期以来,河套灌区小麦生产存在着大水漫灌、肥料滥用情况,限制了小麦产量和品质的提高。众所周知,磷和氮均为植物体内的大量元素,参与构成核酸、蛋白质、磷脂等多种重要化合物,施用磷肥和氮肥对小麦的生长发育、产量构成、品质形成等均具有显著影响^[2-4]。国内外研究表明,磷肥和氮肥的施用均可显著提升小麦的籽粒产量^[5-8]。赵同凯等^[9]研究表明,增施磷肥可显著提高低、中等磷地块的小麦籽粒蛋白质含量,延长面团形成时间和稳定时间,提高品质评价值,改善加工品质;但在高磷地块,施磷量过大会导致小麦籽粒加工品质降低。Xue 等^[10]与郭明明等^[11]研究表明,适当增加施氮量能提高强、中、弱 3 种筋型小麦的蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值、面团形成时间和稳定时间。相关研究表明,小麦的品质形成与整个生育期内氮素的吸收、转运密不可分^[12]。在小麦生育前期,磷肥能促进小麦根系的伸长,从而促进小麦对土壤氮和肥料氮的吸收,提高氮肥利用效率,增强小麦抗旱性^[13];氮肥可促进叶片、茎秆等花前氮素储存器官的生长发育,并提高植株总氮素积累量^[14]。在小麦生育后期,磷肥能提高氮代谢相关酶的活性,增大氮素由营养器官向籽粒的转运速率,加快营养物质的重新分配与再利用,促进光合产物的转运和贮藏^[15];氮肥可延缓叶片衰老,延长植株上

部叶片的功能期,增长灌浆期的同时提高群体光合效率,并提高氮素自营养器官输送至籽粒的转移率^[16-17]。磷肥和氮肥在小麦品质提升中相辅相成,协同发挥关键作用。

受土壤基础肥力、施肥时期、肥料种类、气候条件等众多因素影响,前人研究得到的小麦最佳施肥量存在较大差异^[5-11,18],对河套灌区小麦施肥的参考价值有限。而且目前有关河套灌区充分灌溉下单一肥料对小麦产量、品质影响的研究较多^[19-20],而对节水灌溉条件下氮、磷互作的研究尚不多见。为此,本研究在河套灌区前期研究建立的“春小麦高产节水灌溉模式^[21]”基础上,系统研究磷、氮肥施用量及其互作对小麦产量和加工品质的影响,以为河套灌区春小麦节水、优质、高产栽培技术体系的建立提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在内蒙古巴彦淖尔市五原县新公中镇进行。试验地土壤类型为壤土,基础肥力为:有机质含量 19.63 g/kg,碱解氮含量 53.74 mg/kg,有效磷含量 25.86 mg/kg,速效钾含量 147.98 mg/kg;土壤 pH 7.67。

1.2 试验设计

供试品种为中强筋小麦品种永良 4 号。试验设

磷肥和氮肥两因素:磷肥作种肥,有效磷(P_2O_5)施用量设5个水平,分别为0(P0),32.5(P1),65.0(P2),97.5(P3),130.0(P4)kg/hm²,其中最大施用量为当地农户常规施用量;氮肥作追肥于拔节期随灌水一次性施入,纯氮(N)施入量设5个水平,分别为0(N0),60(N1),120(N2),180(N3),240(N4)kg/hm²,其中最大施用量为当地农户常规施用量。试验采用随机区组设计,共25个处理组合,3次重复,共75个小区,小区面积为20 m²。人工开沟播种,行距15 cm,基本苗设为750万株/hm²。播种期为3月14日,成熟期为7月15日。试验地前茬作物为高粱。生育期内灌水采用节水灌溉模式,即拔节期和开花期灌水2次,每次灌水900 m³/hm²。其他管理措施同常规大田栽培小麦。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 开花期农艺性状 小麦开花期,每个小区采用SPAD-502(日本Minolta公司)测定叶片叶绿素相对含量(SPAD值),采用CIRAS-3光合仪(英国PP-System公司)测定叶片净光合速率,采用SSI SunScan冠层分析仪(美国Eelta-T公司)测定叶面积指数。每个小区取50 cm标记样段,记录株数和茎数,并取20株,分别测量主茎株高、茎粗及所有叶片(含旗叶)的叶长、叶宽和叶面积,单株叶面积为单株小麦所有叶片面积的总和。剪去标记样段的根系,将剩余地上部分置于80℃烘箱烘干并称量干质量,除以20株小麦的平均占地面积后换算成单位面积的地上部干物质量。

1.3.2 产量及考种 小麦蜡熟末期,在每个小区取2 m²样点,单独收获,统计总穗数;晾晒后使用机械脱粒并称质量,采用烘干法测定籽粒含水率,然后按含水率13%校正籽粒质量,换算为实际产量;各小区取有代表性的50 cm样段进行考种,考察穗数、穗粒数、千粒质量。

1.3.3 籽粒品质指标 小麦收获晾晒后储藏2个月。每处理小区取200 g籽粒,使用DA7250型近红外(NIR)谷物分析仪(瑞典Perten公司)测定以下品质指标:籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值、容重、出粉率、吸水率、面团形成时间、面团稳定时间、最大抗延阻力、拉伸面积和延展性。

1.3.4 蛋白质产量 蛋白质产量=籽粒产量×籽粒蛋白质含量。

1.4 数据分析

试验数据采用Microsoft Excel 2019进行汇总、计算等基础分析,方差分析及产量、蛋白质含量与籽粒品质指标的相关性分析使用SPSS Statistics 26.0,二元二次拟合回归分析及绘图使用MATLAB 2019b。

2 结果与分析

2.1 磷、氮肥对小麦开花期农艺性状的影响

由表1可知,小麦开花期农艺性状在不同施肥组间存在明显差异,其中变异系数较大的指标有净光合速率、旗叶面积、叶面积指数,分别为18.23%,16.18%和15.45%。与不施肥处理P0N0相比,施肥处理的植株形态指标(株高、茎粗、旗叶长、旗叶宽、旗叶面积、单株叶面积)、群体指标(叶面积指数、干物质)及生理指标(相对叶绿素含量、净光合速率)均有不同程度提高。株高随施磷量的增加呈先升高后降低的趋势,随施氮量的增加而增大;其余指标随施磷量和施氮量的增加,总体表现为先升高后降低的趋势。相关分析表明,小麦籽粒蛋白质含量与株高、茎粗、旗叶长、单株叶面积、叶面积指数、叶绿素相对含量、净光合速率呈显著或极显著相关关系,表明良好的植株形态、群体结构以及光合生理是小麦优质的重要前提。

表1 不同施磷量和施氮量下小麦开花期的农艺性状

Table 1 Agronomic characteristics of wheat at flowering stage under different phosphorus and nitrogen application rates

磷 P	氮 N	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem thick	旗叶长/cm Flag leaf length	旗叶宽/cm Flag leaf width	旗叶面积/cm ² Flag leaf area	单株叶面积/cm ² Leaf area of per plant	相对叶绿素含量 (SPAD) Chlorophyll content	叶面积指数/(m ² ·m ⁻²) Leaf area index	干物质/(kg·hm ⁻²) Dry matter	净光合速率/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Photosynthetic rate
	N0	58.6 c	0.23 c	15.9 c	0.8 a	10.43 b	35.97 c	33.04 c	3.53 c	8 943.2 d	10.2 c
	N1	60.2 c	0.27 b	17.9 b	0.8 a	11.74 b	38.43 b	44.14 b	3.69 c	9 078.3 c	13.3 b
P0	N2	65.3 b	0.30 a	19.4 a	0.9 a	14.32 a	42.13 a	44.91 b	4.38 a	9 770.7 b	15.0 a
	N3	69.6 ab	0.32 a	20.4 a	0.9 a	15.06 a	46.19 a	51.82 a	4.75 a	1 0841.4 a	16.7 a
	N4	72.4 a	0.26 b	18.8 ab	0.8 a	10.79 b	37.52 b	50.04 a	4.23 b	9 230.7 c	15.8 a

表 1(续) Continued table 1

磷 P	氮 N	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem thick	旗叶长/cm Flag leaf length	旗叶宽/cm Flag leaf width	旗叶面积/cm ² Flag leaf area	单株叶面积/cm ² Leaf area of per plant	相对叶绿素含量 (SPAD) Chlorophyll content	叶面积指数/ (m ² ·m ⁻²) Leaf area index	干物质/ (kg·hm ⁻²) Dry matter	净光合速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Photosynthetic rate
P1	N0	60.7 c	0.27 c	16.8 d	0.8 a	11.02 c	36.06 c	37.97 c	3.13 d	9 005.4 d	12.0 c
	N1	64.4 b	0.29 bc	17.5 c	0.8 a	11.48 bc	36.55 c	46.42 b	3.66 c	9 853.4 c	14.1 c
	N2	69.1 a	0.31 b	19.3 ab	0.8 a	12.66 b	43.25 b	49.26 ab	4.57 b	10 413.2 b	17.0 b
	N3	71.7 a	0.34 a	21.0 a	0.9 a	15.50 a	50.99 a	52.37 a	5.49 a	11 340.5 a	19.0 a
	N4	72.2 a	0.28 c	18.4 b	0.8 a	10.56 c	40.26 bc	51.39 a	4.40 b	10 513.2 b	17.9 a
P2	N0	64.5 d	0.25 c	14.8 c	0.8 a	8.50 c	32.90 d	37.69 c	4.04 d	9 764.3 d	12.4 d
	N1	70.0 c	0.28 b	15.6 c	0.8 a	10.23 b	36.93 c	49.52 b	4.33 c	10 552.1 c	14.5 c
	N2	72.9 b	0.31 a	17.8 b	0.8 a	11.68 b	42.03 b	50.43 b	4.61 b	11 624.9 b	17.8 b
	N3	73.4 b	0.32 a	20.1 a	0.9 a	13.19 a	47.09 a	53.21 a	5.30 a	12 348.2 a	20.3 a
	N4	77.3 a	0.30 ab	19.5 a	0.8 a	11.19 b	40.62 b	50.72 b	4.84 b	10 564.7 c	18.5 ab
P3	N0	63.2 c	0.26 d	15.2 d	0.8 a	8.72 d	34.48 c	32.61 c	3.42 e	9 734.1 c	13.8 d
	N1	70.3 b	0.29 c	16.3 c	0.8 a	10.69 c	40.72 b	49.45 b	3.99 d	10 234.4 c	15.1 c
	N2	71.5 ab	0.33 a	18.7 ab	0.9 a	12.27 b	42.42 b	49.66 b	4.76 b	11 875.7 b	18.5 b
	N3	72.8 a	0.35 a	19.1 a	0.9 a	14.10 a	48.09 a	52.29 a	5.65 a	12 854.6 a	21.6 a
	N4	73.1 a	0.31 b	18.4 b	0.8 a	12.07 b	40.16 b	50.26 b	4.36 c	11 946.6 b	18.7 b
P4	N0	62.2 d	0.26 b	14.3 c	0.8 a	9.38 c	32.73 e	35.43 c	3.31 d	9 702.8 c	12.8 d
	N1	68.5 c	0.28 b	15.7 c	0.8 a	10.30 bc	35.78 d	47.44 b	3.97 c	9 976.5 c	14.6 c
	N2	72.2 b	0.32 a	17.4 b	0.9 a	11.41 b	39.08 b	48.23 b	5.36 b	10 487.4 bc	17.7 b
	N3	72.3 b	0.33 a	19.5 a	0.9 a	14.39 a	45.58 a	52.06 a	5.24 a	12 118.8 a	20.8 a
	N4	75.6 a	0.30 ab	17.8 b	0.8 a	10.22 bc	37.07 c	51.01 a	4.50 b	10 988.1 b	17.6 b
平均值 Mean		68.7	0.29	17.8	0.8	11.68	40.12	46.85	4.34	10 550.5	16.2
变异系数/% CV		7.70	10.29	10.34	8.49	16.18	11.98	13.55	15.45	10.45	18.23
相关系数 R		0.439*	0.403*	0.622**	-0.002	0.388	0.441*	0.525**	0.518**	0.304	0.458*

注:相关系数指籽粒蛋白质含量与相关农艺性状间的相关系数。*和**分别表示显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)相关。同一磷水平处理下同列数据后标不同小写字母表示氮处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Correlation coefficients are between grain protein content and related agronomic traits. "*" and "**" indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) correlation, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences between nitrogen treatments at same phosphorus level ($P<0.05$).

2.2 磷、氮肥对小麦产量及其构成因素的影响 素如表 2 所示。

不同施磷量和施氮量下小麦的产量及其构成因

表 2 不同施磷量和施氮量下小麦的产量及其构成因素

Table 2 Yield and its constituent factors of wheat under different phosphorus and nitrogen application rates

处理 Treatment	水平 Level	穗数/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Spikes	穗粒数 Grains per spike	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield
P	P0	746.98 b	30.56 c	30.56 a	5 217.5 d
	P1	753.96 b	32.56 a	31.70 a	5 834.5 bc
	P2	766.42 ab	31.46 abc	32.16 a	6 128.6 a
	P3	802.68 a	31.94 ab	31.66 a	6 087.3 ab
	P4	772.16 ab	31.10 bc	31.46 a	5 678.0 c
N	N0	672.58 c	27.46 d	31.10 bc	4 320.2 d
	N1	752.72 b	30.32 c	33.22 a	5 548.6 c
	N2	814.44 a	32.52 b	30.12 c	6 194.7 b
	N3	826.18 a	33.80 a	30.66 c	6 600.2 a
	N4	776.28 b	33.52 ab	32.44 ab	6 282.2 b
变异来源 Source of variation	P	4.70**	3.53*	2.08	23.86**
	N	37.73**	42.12**	9.94**	143.52**
	P×N	1.17	2.96**	6.05**	2.80**

注:同一养分处理下同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*、**分别表示养分对相关的农艺性状有显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)影响。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments for same nutrient ($P<0.05$). "*" and "**" indicate significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) effects of nutrients on related agronomic traits. The same below.

表2表明,施磷量对小麦的穗数、穗粒数及产量影响均达显著或极显著水平,对千粒质量的影响未达显著水平。不施磷处理P0的小麦产量最低,为5 217.5 kg/hm²,施磷处理P1、P2、P3、P4较不施磷处理P0分别增产11.8%,17.5%,16.7%和8.8%。施氮量对小麦的穗数、穗粒数、千粒质量及产量的影响均达极显著水平,不施氮处理N0产量为4 320.2 kg/hm²,施氮处理N1、N2、N3、N4较不施氮处理N0分别增产28.4%,43.4%,52.8%和45.4%。从增产效果来看,本试验条件下磷肥的增产效果远不

及氮肥。小麦产量及其构成因素随施磷量、施氮量的增加整体上均表现为先升高后降低的二次曲线变化趋势,表明适当增施磷肥和氮肥均可显著提高小麦籽粒产量,但过量施用会导致产量降低。产量受氮磷互作效应影响达极显著水平,表明施磷量和施氮量间存在相互制约,改变施磷量会使最佳施氮量改变。

2.3 磷、氮肥对小麦加工品质的影响

2.3.1 对小麦一次加工品质的影响 不同施磷量和施氮量下小麦的一次加工品质见表3。

表3 不同施磷量和施氮量下小麦的一次加工品质

Table 3 Primary processing quality of wheat under different phosphorus and nitrogen rates

处理 Treatment	水平 Level	蛋白质含量/% Content of protein	容重/(g·L ⁻¹) Test weight	出粉率/% Flour extraction
P	P0	15.40 a	801.87 a	72.73 a
	P1	15.99 a	801.93 a	73.00 a
	P2	15.73 a	800.80 a	72.60 a
	P3	15.38 a	805.47 a	73.33 a
	P4	14.40 b	802.47 a	72.93 a
N	N0	14.06 c	796.27 a	72.60 a
	N1	15.24 b	802.60 a	73.07 a
	N2	15.64 ab	805.93 a	73.00 a
	N3	15.80 ab	800.80 a	73.07 a
	N4	16.15 a	806.93 a	72.87 a
变异来源 Source of variation	P	5.49**	0.26	0.79
	N	9.89**	1.52	0.39
	P×N	3.04**	0.89	0.52
变异系数/% CV		8.01	0.91	0.71

由表3可知,施磷量和施氮量及其互作对蛋白质含量的影响均达极显著水平,但对出粉率、容重均无显著影响。蛋白质含量随施磷量的增加呈先升高后降低的趋势,于P1处理达到最大值,施磷处理P1和P2蛋白质含量较不施磷(P0)处理分别增加2.1%和3.8%,而施磷处理P3、P4蛋白质含量较不施磷(P0)处理分别降低0.1%和6.5%,表明适宜增施磷肥可以提高小麦籽粒蛋白质含量,但施磷量过大则导致蛋白质含量不增反降。与施磷量不同的是,蛋白质含量随着施氮量的增加呈线性增加趋势,N1、N2、N3、N4处理的蛋白质含量较不施氮处理(N0)依次提高8.4%,11.2%,12.4%和14.9%,表明增施氮肥对蛋白质含量的提升是有利的,且在一定范围内施氮量越高,蛋白质含量提升幅度越大。小麦一次加工品质受施磷量、施氮量及其互作影响的程度也表现为施氮量>施磷量>氮磷互作。

2.3.2 对小麦二次加工品质的影响 方差分析结果(表4)表明,施磷量对湿面筋含量、面团形成时间、沉降值、拉伸面积、延展性、最大抗延阻力等6项

二次加工品质指标的影响达显著或极显著水平。二次加工品质随施磷量的增加表现为先升高后降低的变化趋势,但不同指标达到最高点的施磷量并不一致。湿面筋含量、面团形成时间、延展性达到最大值的施磷量处理为P1,与蛋白质质量密切的面团稳定时间、沉降值、拉伸面积达到最大值的施磷量处理为P2,吸水率、最大抗延阻力达到最大值的施磷量处理为P3。当施磷量自P1增至P2,蛋白质含量虽略微下降,但差异并不显著,且蛋白质质量有所提升。说明,在一次加工品质达到最佳的施磷量基础上,适当增大施磷量有利小麦二次加工品质的提升。

施氮量对所有测定的二次加工品质指标影响均达显著或极显著水平。整体来看,各项二次加工品质指标随施氮量的增加呈持续升高趋势,不施氮处理N0的各项二次加工品质均表现为最低,而最大施氮量处理N4则表现为最高,与蛋白质含量的变化规律一致。施氮量的增加不仅提高了小麦的一次加工品质,对小麦二次加工品质的提高也具有显著促进作用。氮磷互作效应对吸水率、拉伸面积、最大

抗延阻力的影响未达显著水平,对其余二次加工品质指标的影响均达显著或极显著水平。

表 4 不同施磷量和施氮量下小麦的二次加工品质

Table 4 Secondary processing quality of wheat under different phosphorus and nitrogen rates

处理 Treatment	水平 Level	湿面筋 含量/% Wet gluten content	吸水率/% Water absorb rate	面团稳定 时间/min Dough stability time	面团形 成时间/min Dough development time	沉降值/mL Sedimentation value	拉伸面积/cm ² Extensibility area	延展性/mm Dough malleability	最大抗延 阻力/E. U Maximum resistance
P	P0	32.37 a	62.26 a	7.41 ab	4.73 a	44.40 a	104.53 bc	183.13 b	367.27 ab
	P1	33.71 a	62.23 a	8.65 a	4.92 a	46.32 a	105.73 abc	190.20 a	342.33 b
	P2	33.07 a	62.33 a	8.97 a	4.89 a	46.52 a	114.53 a	186.67 ab	394.87 a
	P3	32.39 a	62.57 a	7.86 ab	4.87 a	44.17 a	109.07 ab	182.47 bc	406.73 a
	P4	30.07 b	61.79 a	6.95 b	4.17 b	40.42 b	98.07 c	176.47 c	345.07 b
N	N0	29.22 c	61.13 b	5.64 c	3.74 c	39.07 c	97.20 b	175.93 b	306.93 b
	N1	31.94 b	62.03 a	7.70 b	4.52 b	43.27 b	105.47 ab	185.00 a	333.00 b
	N2	33.01 ab	62.78 a	8.18 ab	5.04 ab	45.35 ab	107.87 a	184.33 a	392.73 a
	N3	33.40 ab	62.89 a	8.74 ab	5.01 ab	46.48 a	110.40 a	186.80 a	406.27 a
	N4	34.05 a	62.35 a	9.58 a	5.27 a	47.67 a	111.00 a	186.87 a	417.33 a
变异来源 Source of variation	P	5.29**	0.82	2.45	3.18*	5.41**	4.11**	5.29**	3.52*
	N	10.07**	5.05**	7.57**	11.9**	10.27**	3.49*	4.13**	9.88**
	P×N	3.08**	0.72	3.14**	1.48*	3.25**	1.42	3.18**	1.03

2.3.3 小麦产量、蛋白质含量与籽粒品质指标的相关性 相关分析(表 5)表明,容重与最大抗延阻力呈显著正相关,与出粉率呈极显著正相关,但与其余品质指标及产量无显著相关关系。蛋白质含量与湿面筋含量、吸水率、面团形成时间、面团稳定时间、沉

降值、拉伸面积、延展性和最大抗延阻力均呈显著或极显著正相关。因此,蛋白质含量可直接评估小麦籽粒加工品质的优劣。蛋白质含量与小麦籽粒产量也存在极显著正相关关系,表明适当增施氮肥和磷肥对小麦产量和品质的协同提高具有正效应。

表 5 小麦产量、蛋白质含量与籽粒品质指标的相关性

Table 5 Correlation between wheat yield, protein content and grain quality indicators

指标 Indexes	蛋白质 含量 Content of protein	容重 Test weigh	出粉率 Flour extraction	湿面筋 含量 Wet gluten content	吸水率 Water absorb rate	面团稳定 时间 Dough stability time	面团形 成时间 Dough Develop- ment time	沉降值 Sedimen- tation value	拉伸面积 Extensibility area	延展性 Dough malleability	最大抗延 阻力 Maximum resistance
产量 Yield	0.548**	0.387	0.326	0.557**	0.717**	0.562**	0.701**	0.551**	0.597**	0.405*	0.742**
蛋白质 含量 Content of protein		0.099	-0.004	0.998**	0.746**	0.918**	0.924**	0.988**	0.751**	0.948**	0.431*

注: * 表示品质指标的相关系数达到显著水平($P < 0.05$), ** 表示品质指标的相关系数达到极显著水平($P < 0.01$)。

Note: * Indicates significant correlation ($P < 0.05$), and ** Indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

2.4 小麦产量、蛋白质产量与磷、氮肥施用量的关系

将小麦产量(Y_1)、蛋白质产量(Y_2)与施磷量(X_P)、施氮量(X_N)进行二元二次拟合回归分析,得到如下回归方程:

$$Y_1 = 3589.6 - 0.162X_P^2 - 0.066X_N^2 + 26.950X_P + 25.436X_N - 0.012X_P X_N, R^2 = 0.986$$

$$Y_2 = 523.49 - 0.037X_P^2 - 0.012X_N^2 + 4.955X_P + 4.462X_N, R^2 = 0.935$$

产量和蛋白产量回归方程的 R^2 分别达到了 0.986 和 0.935,表明方程拟合度较好,能反映磷、氮肥施用量与小麦产量、蛋白质产量的关系(图 1)。通过 MATLAB 软件调用“-(fminsearch)”函数,分

别求得两个回归方程的极大值及其对应的氮、磷肥施用量,即当施磷量为 72.5 kg/hm^2 、施氮量为 181.7 kg/hm^2 时,可获得最高籽粒产量 6877.1 kg/hm^2 ;当施磷量为 66.2 kg/hm^2 、施氮量为 193.3 kg/hm^2 时,可获得最高蛋白质产量 1118.7 kg/hm^2 。小麦优质与高产统一的适宜施磷(P_2O_5)量为 $66.2 \sim 72.5 \text{ kg/hm}^2$,施氮(纯 N)量为 $181.7 \sim 193.3 \text{ kg/hm}^2$ 。最高产量较农户常规施肥量($P4N4$ 处理)的产量(6118.4 kg/hm^2)增加 12.4% ,最高蛋白质产量较 $P4N4$ 处理(966.7 kg/hm^2)增加 15.7% ,同时减少施磷量 $44.3\% \sim 49.1\%$,减少施氮量 $19.5\% \sim 24.3\%$ 。

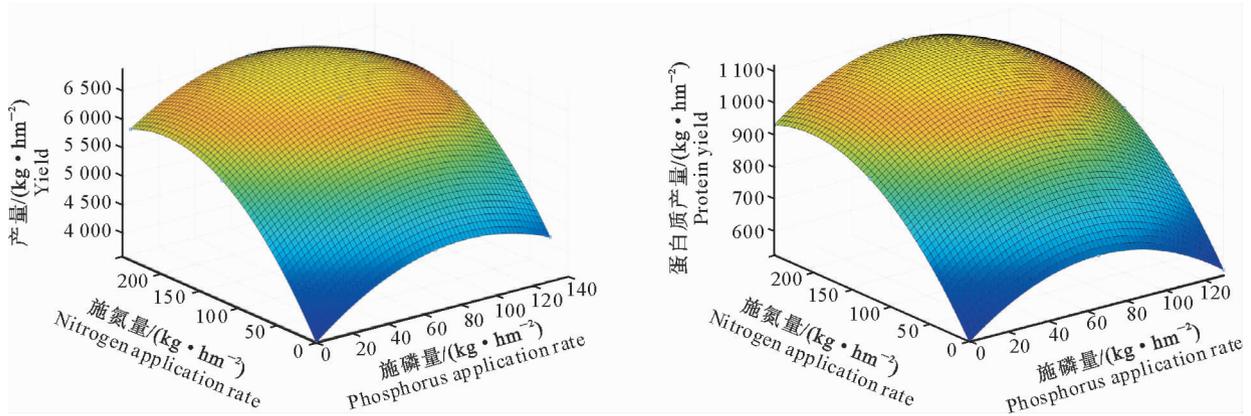


图 1 施磷量、施氮量与小麦籽粒产量(左)和蛋白质产量(右)的响应曲面

Fig. 1 Response surface of phosphorus and nitrogen application rate with wheat grain yield (left) and protein yield (right)

3 讨 论

作物产量是由单位面积穗数、穗粒数及千粒质量 3 个因素共同构成^[22]。施磷量和施氮量通过提高小麦产量构成因素进而提高小麦籽粒产量^[23],但施磷量和施氮量对小麦穗数、穗粒数和千粒质量的影响程度并不一致。马清霞等^[24]研究表明,合理施磷对小麦产量构成要素的影响因地区而异,但多数地区表现为施磷量对小麦的穗数和穗粒数有显著的促进作用,而对千粒质量无显著影响。马瑞琦等^[25]研究表明,适宜的施氮量可以协调提高穗数、穗粒数与千粒质量,进而显著提高小麦产量。本研究发现,施磷量显著影响小麦的穗数和穗粒数,而施氮量则对穗数、穗粒数、千粒质量均具有显著影响,这与前人的研究结论基本一致。磷肥和氮肥合理配施可促进小麦根茎生长及分蘖与穗花发育,从而提高穗数、穗粒数,延长灌浆期,提高灌浆速率及千粒质量,进而全面提升小麦产量^[26-27]。

长期以来,我国小麦生产中常追求高产而忽视了品质,致使小麦的供给与需求脱节,出现了普通小麦积压而优质小麦依赖进口的现象。小麦籽粒品质包括形态品质、营养品质和加工品质 3 个方面,其中加工品质直接决定面食的质量。有研究表明,适宜的施磷量可明显改善小麦加工品质,但营养品质不受影响^[28-29]。当施磷过量时,湿面筋含量与沉降值会降低,致使小麦籽粒加工品质变劣。本研究中小麦籽粒的一、二次加工品质随施磷量的增加表现为先升高后降低的趋势,这与前人的研究结果相近。Noureldin 等^[30]与 Yang 等^[31]研究表明,在一定范围内小麦加工品质与氮肥用量呈正相关,随施氮量的增加,小麦籽粒蛋白质含量、干湿面筋含量、沉淀

值、面团稳定时间和面团拉力等品质指标同步升高,但过量施氮则使品质降低。本研究中小麦品质随施氮量的增加而提高,并未出现降低趋势,这一点与前人研究结论并不一致,可能原因是试验设计的最高施肥量为农户常规施肥量,施氮量仍低于品质最佳时的施氮量。

本研究发现,磷肥对小麦产量和品质的改良效果不及氮肥,小麦产量和品质受施磷量和施氮量影响表现为施氮量>施磷量>氮磷互作,这与张焕军等^[32]和齐尚红等^[33]的研究结论相同。多项研究表明,产量水平是探讨施磷量和施氮量对小麦产量和品质影响的重要前提^[34-37]。不同产量水平(低、中、高)对磷肥和氮肥的需求存在较大差异,在土壤基础营养极度亏缺的条件下,磷素是维持小麦基础代谢、生长发育并形成产量的基本限制因素;在产量进入中高产阶段,磷肥、氮肥互相作用,共同促进小麦的生长发育,产量和品质同步提高,这也正是本研究相关分析得出产量与品质呈显著正相关的直接原因;当产量进入高产或更高产阶段,营养生长与生殖生长的矛盾与协调难度加大,导致产量与品质、积累与分配处于矛盾之中,产量与品质的负向关系就凸显出来,此阶段若蛋白质产量达到最大,则可实现优质和高产的相对统一。本研究通过回归分析分别求得了籽粒产量和蛋白质产量最大时分别对应的施磷量和施氮量,优化了河套灌区春小麦实现优质与高产统一的施肥量。

4 结 论

磷肥和氮肥合理配施有利于小麦产量与品质的协同提高。综合分析表明,河套灌区节水灌溉模式下小麦优质高产相统一的施磷量为 66.2~72.5

kg/hm²,施氮量为 181.7~193.3 kg/hm²。与农户常规施肥模式相比,该施肥模式施磷量减少 44.3%~49.1%,施氮量减少 19.5%~24.3%,小麦增产 12.4%。

[参考文献]

- [1] 李晓娟,关雯雯,董玉新,等.不同农艺措施对河套灌区节水春小麦氮素利用的影响[J].安徽农业科学,2014,42(11):3199-3202.
Li X J,Guan W W,Dong Y X,et al. Influence of different agronomic measures on nitrogen use efficiency of water-saving spring wheat in Hetao irrigation district [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2014,42(11):3199-3202.
- [2] Zörb C,Ludewig U,Hawkesford M J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply [J]. Trends in Plant Science,2018,23(11):1029-1037.
- [3] Duncan E G,O'Sullivan C A,Roper M M,et al. Yield and nitrogen use efficiency of wheat increased with root length and biomass due to nitrogen,phosphorus,and potassium interactions [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2018,181(3):364-373.
- [4] 吴强.河套灌区小麦品质与产量协同提高关键栽培技术研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
Wu Q. Study on key cultivation techniques for synergistic improvement of wheat quality and yield in Hetao irrigation district [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [5] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等.施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(6):658-665.
Li T L,Xie Y H,Hong J P,et al. Effects of phosphorus application rates on winter wheat yield and phosphorus use efficiency in drylands of South Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2013,21(6):658-665.
- [6] Sohail M,Hussain I,Tanveer S K,et al. Effect of nitrogen fertilizer application methods on wheat yield and quality [J]. Science,2018,37(2):89-92.
- [7] Lázaro L,Abbate P E,Cogliatti D H,et al. Relationship between yield,growth and spike weight in wheat under phosphorus deficiency and shading [J]. The Journal of Agricultural Science,2010,148(1):83-93.
- [8] Panayotova G,Kostadinova S,Valkova N. Grain quality of durum wheat as affected by phosphorus and combined nitrogen-phosphorus fertilization [J]. Scientific Papers,2017,60(29):356-363.
- [9] 赵同凯,张超,曹连杰,等.磷素营养对小麦品质的影响[J].河南农业科学,2009(3):17-19.
Zhao T K,Zhang C,Cao L J,et al. Effect of phosphorus nutrition on wheat quality [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2009(3):17-19.
- [10] Xue C,Schulte G,Rucker S,et al. Late nitrogen application

increased protein concentration but not baking quality of wheat [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2016,179(4):591-601.

- [11] 郭明明,董召娣,易媛,等.氮肥运筹对不同筋型小麦产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2014,34(11):1559-1565.
Guo M M,Dong Z D,Yi Y,et al. Effects of nitrogen management on grain yield and quality of wheat cultivars with different gluten types [J]. Journal of Triticeae Crops,2014,34(11):1559-1565.
- [12] 李亚静,刘添,张敏,等.小麦产量和品质与施氮量关系的研究进展[J].安徽农业科学,2018,46(36):6-9,12.
Li Y J,Liu T,Zhang M,et al. Research progress of effect of nitrogen fertilization on grain yield and quality of wheat [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2018,46(36):6-9,12.
- [13] 邢丹,李淑文,夏博,等.磷肥施用对冬小麦产量及土壤氮素利用的影响[J].应用生态学报,2015,26(2):437-442.
Xing D,Li S W,Xia B,et al. Effects of phosphorus fertilization on yield of winter wheat and utilization of soil nitrogen [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(2):437-442.
- [14] Lollato R P,Figueiredo B M,Dhillon J S,et al. Wheat grain yield and grain-nitrogen relationships as affected by N,P,and K fertilization: a synthesis of long-term experiments [J]. Field Crops Research,2019,236:42-57.
- [15] 陈雨露,康娟,王家瑞,等.灌水与施磷对小麦氮素积累运转及水分利用效率的影响[J].麦类作物学报,2019,39(9):1095-1104.
Chen Y L,Kang J,Wang J R,et al. Effect of irrigation and phosphorus application on nitrogen accumulation and water use efficiency of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops,2019,39(9):1095-1104.
- [16] Zheng X,Yu Z,Zhang Y,et al. nitrogen supply modulates nitrogen remobilization and nitrogen use of wheat under supplemental irrigation in the north China plain [J]. Scientific Reports,2020,10(1):1-10.
- [17] 王月福,于振文,李尚霞,等.氮素营养水平对冬小麦氮代谢关键酶活性变化和籽粒蛋白质含量的影响[J].作物学报,2002(6):743-748.
Wang Y F,Yu Z W,Li S X,et al. Effect of nitrogen nutrition on the change of key enzyme activity during the nitrogen metabolism and kernel protein content in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica,2002(6):743-748.
- [18] Zhu X,Li C,Jiang Z,et al. Responses of phosphorus use efficiency,grain yield,and quality to phosphorus application amount of weak-gluten wheat [J]. Journal of Integrative Agriculture,2012,11(7):1103-1110.
- [19] 李文彪,郑海春,郜翻身,等.内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1327-1334.
Li W B,Zheng H C,Gao F S,et al. Study on index of fertilizer recommendation for spring wheat in Hetao irrigated Area

- [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1327-1334.
- [20] 郭富强, 史海滨, 杨树青, 等. 河套灌区氮素流失分析及最佳施氮量的确定 [J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1477-1482.
Guo F Q, Shi H B, Yang S Q, et al. Analysis of nitrogen loss and determination of optimum rates of nitrogen application in Hetao Irrigation Area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1477-1482.
- [21] 张永平, 谢岷, 井涛, 等. 内蒙古河套灌区春小麦高产节水灌溉制度研究 [J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(1): 96-102.
Zhang Y P, Xie M, Jing T, et al. Study on the irrigation schedule for high-yield and water-saving production of spring wheat in Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(1): 96-102.
- [22] Gul H, Said A, Saeed B, et al. Response of yield and yield components of wheat towards foliar spray of nitrogen, potassium and zinc [J]. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 2011, 6(2): 23-25.
- [23] 冯媛媛, 申艳, 徐明岗, 等. 施磷量与小麦产量的关系及其对土壤、气候因素的响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 683-691.
Feng Y Y, Shen Y, Xu M G, et al. Relationship between phosphorus application amount and grain yield of wheat and its response to soil and climate factors [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 683-691.
- [24] 马清霞, 王朝辉, 惠晓丽, 等. 基于产量和养分含量的旱地小麦施磷量和土壤有效磷优化 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52(1): 73-85.
Ma Q X, Wang C H, Hui X L, et al. Optimization of phosphorus rate and soil available phosphorus based on grain yield and nutrient contents in dryland wheat production [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(1): 73-85.
- [25] 马瑞琦, 陶志强, 王德梅, 等. 追氮量对强筋和中筋小麦产量与品质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1799-1807.
Ma R Q, Tao Z Q, Wang D M, et al. Effect of nitrogen top-dressing rate on yield and quality of medium and strong gluten wheat cultivars [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1799-1807.
- [26] 姜宗庆, 封超年, 黄联杰, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 628-634.
Jiang Z Q, Feng C N, Huang L L, et al. Effects of phosphorus application on dry matter production and phosphorus uptake in wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(5): 628-634.
- [27] Nyiraneza J, Cambouris A N, Ziadi N, et al. Spring wheat yield and quality related to soil texture and nitrogen fertilization [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(3): 589-599.
- [28] Ibrahim M, Mahmoud E, Gad L, et al. Effects of biochar and phosphorus fertilizer rates on soil physical properties and wheat yield on clay textured soil in middle Nile Delta of Egypt [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(21): 2756-2766.
- [29] 李诚, 王晓丽, 陈和平, 等. 磷运筹和干旱胁迫对冬小麦农艺性状和品质性状的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(7): 826-834.
Li C, Wang X L, Chen H P, et al. Effect of phosphorus strategy and drought stress on agronomic traits and quality traits in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(7): 826-834.
- [30] Noureldin N A, Saady H S, Ashmawy F, et al. Grain yield response index of bread wheat cultivars as influenced by nitrogen levels [J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2013, 58(2): 147-152.
- [31] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 479-485.
- [32] 张焕军, 郁红艳, 项剑, 等. 氮磷用量对豫北地区小麦产量的交互效应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(6): 1163-1169.
Zhang H J, Yu H Y, Xiang J, et al. Interactive influence of nitrogen and phosphorus application rate on wheat yield in North Henan, China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6): 1163-1169.
- [33] 齐尚红, 王冰洁, 姜金艳. 优质小麦产量的氮磷效应模型研究 [J]. *农业科技通讯*, 2007(9): 35-37.
Qi S H, Wang B J, Jiang J Y. Study on nitrogen and phosphorus effect model of high-quality wheat yield [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2007(9): 35-37.
- [34] 付国占. 磷氮配施对小麦籽粒产量和品质的影响及其生理基础 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2007.
Fu G Z. Effects of application of phosphorus combined with nitrogen fertilizer on grain yield and quality in wheat and the physiological basis [D]. Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2007.
- [35] 柴红敏, 蔡焕杰, 王健, 等. 调亏灌溉下小麦产量与品质协调统一的可能性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(12): 4915-4917.
Chai H M, Cai H J, Wang J, et al. Analysis of the harmony probability of wheat grain yield and quality under regulated deficit irrigation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(12): 4915-4917.
- [36] 孙慧敏, 于振文, 颜红, 等. 施磷量对小麦品质和产量及氮素利用的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(2): 135-138.
Sun H M, Yu Z W, Yan H, et al. Effect of phosphorus rate applied on quality, yield and nitrogen utilization in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(2): 135-138.
- [37] Mäder P, Hahn D, Dubois D, et al. Wheat quality in organic and conventional farming; results of a 21 year field experiment [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87(10): 1826-1835.