

减量追氮对冀东地区春小麦磷、钾肥利用及品质的影响

王佳童 马映辰 冯燕飞 路佳慧 郭振清 李学利 李 云 韩玉翠 林小虎

(河北科技师范学院农学与生物科技学院/河北省作物逆境生物学重点实验室, 066004, 河北秦皇岛)

摘 要 为探究减量追氮对冀东地区春小麦磷钾肥利用及品质的影响, 以春小麦津强 11 为材料, 参考生产中小麦种植常规施氮量 (N_{240} kg/hm^2), 设置 4 个氮肥水平 (0、80、160、240 kg/hm^2 , 分别表示为 N_0 、 N_{80} 、 N_{160} 和 N_{240}), 分析减量追氮对冀东地区春小麦植株磷钾素积累量、氨基酸含量、矿质元素含量以及产量的影响。结果表明, 减量追氮提高了生育后期磷素积累量, 减氮至 N_{80} 时, 成熟期磷素积累量为 45.68 kg/hm^2 , 显著高于 N_{160} 和 N_{240} ; 减量追氮降低了生育后期钾素的损失, 减氮至 N_{80} 时, 成熟期的钾素积累量比开花期损失了 36.45%, 显著低于 N_{160} 和 N_{240} 。减氮至 N_{80} 和 N_{160} 时, 必需、非必需氨基酸含量和氨基酸总量均显著高于 N_0 和 N_{240} 处理, 有利于氨基酸的合成。各氨基酸评分基本都在 N_{80} 和 N_{160} 处理下达到最大值; 必需氨基酸指数在 N_{80} 处理下达到最大值, N_{160} 处理次之, 且在 N_{80} 和 N_{160} 处理下分别比 N_0 处理增加 14.64% 和 7.48%, 比 N_{240} 处理分别增加 13.19% 和 6.12%, 说明减氮至 N_{80} 和 N_{160} 可以提高蛋白质质量。减氮至 N_{80} 和 N_{160} 时, Ca、Mg、Fe、Cu 和 Zn 矿质元素含量较高, 说明可以提高春小麦矿质元素含量。减氮至 N_{80} 和 N_{160} 时, 产量显著高于 N_0 和 N_{240} 处理, 且 N_{80} 与 N_{160} 处理间没有显著性差异。综上, 建议冀东地区春小麦种植的最佳追氮量为 80~160 kg/hm^2 。

关键词 春小麦; 磷钾素积累量; 氨基酸; 矿质元素; 品质

小麦作为我国重要的粮食作物之一, 其产量和品质是确保粮食安全及推动经济发展的基础。随着人们生活水平提高, 对高产优质小麦的需求也不断增加^[1]。施用化肥对作物的生长起着重要的作用, 是最有效和最重要的增产措施之一, 对保障作物高产优质高效有重要作用^[2-4]。氮素是小麦生长所需的重要营养元素, 施氮是小麦产量形成中容易调控的重要栽培措施^[5], 同时可以提高小麦对土壤磷、钾素的吸收^[6]。杨晓玲等^[7]研究表明, 充足的氮供应能增加植物对磷素的吸收和利用, 增加了磷从共质体向木质部的转运, 同时氮素对植株吸收钾素的能力也具有明显促进作用, 从而提高了小麦产量。氮素不仅可以提高小麦的产量, 还可以调节小麦籽粒的品质^[8], 其中营养品质主要指蛋白质含量和氨基酸组分及其平衡状态, 而必需氨基酸是决定营养品质的关键^[9]。大量研究^[10-11]表明, 施氮肥能明显提高小麦籽粒氨基酸总量和必需氨基酸含量。然而在农业生产实践中, 存在过量施用氮肥来追求高产的现象, 这反而使小麦产量和品质不能随着氮肥施用量的增加而提高^[12]。过量施氮会导致籽粒产量明显

下降, 并且随着施氮量的提高, 小麦对氮肥的响应减弱, 农学利用效率和氮肥偏生产力明显下降^[13]; 并且过量施氮还会降低小麦籽粒品质, Nemat 等^[14]研究认为, 过量施氮会使小麦籽粒蛋白质含量、干湿面筋含量和沉淀值等品质指标降低。氮肥利用率过低会导致资源浪费、水体污染和生态失衡, 威胁着人类健康^[15]。因此, 合理施氮是实现小麦高产、优质、高效和生态安全的必要前提。

冀东地区处于温带季风气候区, 四季分明, 光照充足, 日照稳定, 适宜春小麦种植。近年来, 冀东地区的春小麦种植面积逐渐增加, 常年种植面积约为 2 万 hm^2 ^[16]。前人^[17-18]关于施氮量对春小麦养分吸收利用、产量及品质影响的研究更多集中在甘肃和新疆等地区, 而在冀东地区的研究较少。为此, 本研究以冀东地区种植面积较广的春小麦品种津强 11 为材料, 研究减量追氮对春小麦生长过程中植株磷、钾素积累, 氨基酸与矿质元素含量以及产量的影响, 为减量追氮条件下提高冀东地区春小麦的养分吸收利用效率和品质、节约资源与保护环境提供一定理论基础。

作者简介: 王佳童, 主要从事作物栽培研究, E-mail: jiatongwang2024@163.com

韩玉翠为通信作者, 主要从事作物栽培与遗传育种研究, E-mail: yucuihan84@163.com; 林小虎为共同通信作者, 主要从事作物栽培与遗传育种研究, E-mail: xiaohulin2008@163.com

基金项目: 河北省农业科技成果转化资金项目 (燕山山前平原春小麦—夏玉米一年两熟丰产栽培模式集成与示范); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目 (202201B023); 河北科技师范学院研究生创新资助项目 (CXZZ202310); 河北省大学生创新创业训练计划项目 (S202310798025)

收稿日期: 2024-04-06; **修回日期:** 2024-05-24; **网络出版日期:** 2024-12-04

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2021 年在河北科技师范学院农学与生物科技学院试验站 (119.15° E, 39.70° N) 进行。试验站位于温带大陆性季风气候区, 土壤为壤土。试验地在种植前对 0~20 cm 土壤进行了养分状况测定, 土壤含有机质 20.38 g/kg、全氮 2.14 g/kg、碱解氮 72.24 mg/kg、速效磷 19.78 mg/kg、速效钾 127.14 mg/kg, pH 7.56。

1.2 试验设计

供试春小麦品种为津强 11, 共设置 4 个施氮水平, 分别为 0、80、160 和 240 kg/hm², 分别用 N₀、N₈₀、N₁₆₀ 和 N₂₄₀ 表示, 其中, N₂₄₀ 为生产中常规施氮水平, 每个处理设置 3 次重复, 完全随机排列。小区面积 16 m² (4 m×4 m), 行距 20 cm。磷肥为过磷酸钙 (120 kg/hm²), 钾肥为硫酸钾 (120 kg/hm²), 两者均作为基肥。氮肥为尿素 (含氮 46%), 在拔节期追施。春小麦播种日期为 2021 年 3 月 7 日, 收获日期为 2021 年 6 月 22 日, 基本苗数 600 万/hm², 其他管理措施同当地大田生产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 磷、钾素积累相关指标 分别于拔节期 (4 月 20 日)、孕穗期 (5 月 7 日)、抽穗期 (5 月 14 日)、开花期 (5 月 18 日) 和成熟期 (6 月 22 日) 各取 10 株长势均匀的植株, 将地上部分为叶、鞘、秆、颖壳+穗轴和籽粒, 于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 之后于 75 °C 烘干至恒重, 称量各器官干重, 各器官干重相加为植株干物质积累量。将烘干样品用粉碎机粉碎后, 用 H₂O₂-H₂SO₄ 消煮法进行消煮, 用钼锑抗吸光光度法测定全磷量, 用火焰光度法计算全钾量, 并根据以下公式进行相关指标的计算:

植株磷 (钾) 素积累量=植株干物质积累量×植株含磷 (钾) 量。

1.3.2 籽粒营养品质 采用 Biochrom30 型全自动氨基酸分析仪 (美国通用公司) 测定氨基酸含量。

前处理: 称量 0.1000 g 干燥、均匀性好、过 60 目筛 (0.25 mm) 的样品放入水解管中, 加入 6 mol/L 的盐酸水解, 在 105 °C 的烘箱中处理 22 h, 取出后用纯水定容至 25 mL, 将水解液过滤, 吸取 1 mL 滤液于旋转蒸发仪中, 蒸发至干, 加入 1 mL 纯水溶解, 再蒸干, 重复 2 次后, 用 2 mL pH 2.2 缓冲

液溶解, 待上机测定。对样品进行小麦籽粒品质评定, 根据以下公式进行相关指标计算:

必需氨基酸评分 (AAS)=测定的必需氨基酸含量/标准蛋白质参考值;

氨基酸比值系数 (RC)=AAS/AAS 均值;

必需氨基酸指数 (EAAI) = $\sqrt{(100 a/A \times 100 b/B \times 100 c/C \cdots 100 g/G)}$, 式中, 小写字母代表试验蛋白质中必需氨基酸含量, 大写字母代表标准蛋白质中相应必需氨基酸含量。

矿质元素测定: 采用 H₂O₂-H₂SO₄ 消煮法获得成熟期籽粒的消煮液, 采用 Opyima 2100 DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (美国铂金爱尔默公司) 测定。

1.3.3 产量 在成熟期各小区划定 3 个 1 m² 样品进行采样, 人工收割、脱粒、晾晒, 对籽粒进行称重, 并测定其含水量, 最后计算出单位面积小麦产量。

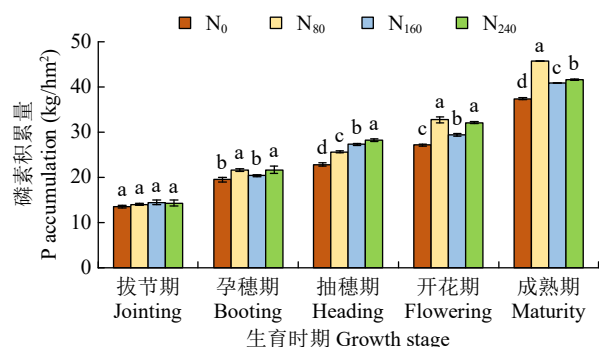
1.4 数据处理

采用 Excel 进行数据整理和制表绘图, 采用 SPSS 26.0 分析数据。

2 结果与分析

2.1 追氮量对春小麦养分吸收和利用的影响

2.1.1 对植株磷素积累量的影响 由图 1 可知, 随着小麦生长发育的进行, 不同追氮水平下植株磷素积累量持续增加, 并在成熟期达到峰值。随着追氮量的增加, 拔节期各追氮处理植株磷素积累量无显著差异; 孕穗期呈现“升—降—升”的趋势, 在 N₈₀ 处理下达到最大值, 为 21.65 kg/hm², 且 N₈₀ 和 N₂₄₀ 处理显著高于 N₀ 和 N₁₆₀ 处理, 但 N₈₀ 和 N₂₄₀



不同小写字母表示 0.05 水平差异显著, 下同。

The different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

图 1 不同追氮处理下植株不同生育时期的磷素积累量
Fig.1 Phosphorus accumulation of plants at different growth stages under different nitrogen topdressing treatments

处理间差异不显著；抽穗期呈不断升高趋势，且各处理间差异显著；开花期呈“升—降—升”的趋势，N₈₀ 处理含量最高，为 32.69 kg/hm²，且 N₈₀ 和 N₂₄₀ 处理显著高于 N₀ 和 N₁₆₀ 处理；成熟期同样表现为“升—降—升”的变化趋势，N₈₀ 处理含量最大，为 45.68 kg/hm²，各处理间差异显著。结果表明，追氮能促进植株对磷素的积累，适宜的氮肥施用量能够促进生育后期植株的磷素积累。

2.1.2 对植株钾素积累量的影响 由图 2 可知，随着小麦生长发育，不同追氮水平下的植株钾素积累量呈现先升后降的趋势，并在开花期达到峰值。随着追氮量增加，拔节期各追氮处理植株钾素积累量无显著差异；孕穗期呈现“升—降—升”的趋势，在 N₂₄₀ 处理下含量达到最大值，为 90.73 kg/hm²，且 N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理显著低于 N₂₄₀ 处理；抽穗期呈不断升高趋势，且各处理之间差异显著；开花期呈“升—降—升”的趋势，N₂₄₀ 处理积累量最高，为 145.16 kg/hm²，且各处理间差异显著，但是在 N₈₀ 处理下钾素积累量迅速增加，比在抽穗期的 N₈₀ 处理下提高 45.80%；成熟期同样表现为“升—降—升”的变化趋势，并且植株的钾素积累量较开花期有一定的降低，且 N₀~N₂₄₀ 各处理间比开花期分别损失了 48.35%、36.45%、52.93%和 49.61%，

在 N₈₀ 处理下损失达到最大值，为 100.65 kg/hm²，各处理间差异显著。表明追氮能够促进植株对钾素的积累，并且适宜的氮肥施用量能够减少生育后期的钾素损失。

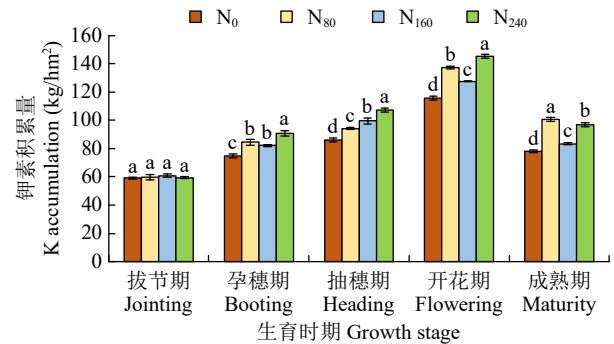


图 2 不同追氮处理下植株不同生育时期的钾素积累量
Fig.2 Potassium accumulation of plants at different growth stages under different nitrogen topdressing treatments

2.2 追氮量对春小麦营养品质的影响

2.2.1 对氨基酸含量的影响 由表 1 可知，必需氨基酸、非必需氨基酸含量和氨基酸总量都随着追氮量的增加呈现先升高后降低的趋势，均在 N₈₀ 处理下含量达到最大值，分别为 77.64、219.27、296.91 mg/g；N₁₆₀ 处理下次之，分别为 72.75、208.17、280.92 mg/g，且 N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理显著高于 N₀ 和 N₂₄₀ 处理，N₀ 与 N₂₄₀ 处理之间没有显著性差

表 1 不同追氮处理对春小麦氨基酸含量的影响

Table 1 Effects of different nitrogen topdressing treatments on amino acid contents of spring wheat					mg/g
指标 Index	N ₀	N ₈₀	N ₁₆₀	N ₂₄₀	
必需氨基酸含量 Essential amino acid content	67.38±0.82c	77.64±0.64a	72.75±0.56b	67.60±0.52c	
非必需氨基酸含量 Non-essential amino acid content	189.74±0.53c	219.27±0.77a	208.17±0.69b	188.89±0.27c	
氨基酸总量 Total amino acid content	257.12±0.82c	296.91±0.64a	280.92±0.56b	256.48±0.52c	

不同小写字母表示 0.05 水平差异显著，下同。

The different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

异，说明减量追氮有利于氨基酸的合成。

由表 2 可知，追氮量对蛋氨酸、苏氨酸和赖氨酸含量无显著影响，而对其他必需氨基酸含量均有显著影响，从变异系数看，追氮量对异亮氨

酸、亮氨酸和苯丙氨酸含量影响较大。其中，异亮氨酸含量在 N₈₀ 处理下达到最大值，为 9.33 mg/g；在 N₁₆₀ 处理下次之，为 8.48 mg/g，且 N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理显著高于 N₀ 和 N₂₄₀。亮氨酸和苯丙氨酸含量

表 2 不同追氮处理对春小麦必需氨基酸含量的影响

Table 2 Effects of different nitrogen topdressing treatments on essential amino acid contents of spring wheat						mg/g
指标 Index	N ₀	N ₈₀	N ₁₆₀	N ₂₄₀	变异系数 Coefficient of variation (%)	
缬氨酸 Val	10.76±0.82b	12.24±0.64a	11.20±0.56ab	11.10±0.52ab	5.63	
蛋氨酸 Met	3.35±0.17a	3.60±0.36a	3.78±0.16a	3.47±0.15a	5.13	
异亮氨酸 Ile	7.74±0.22c	9.33±0.47a	8.48±0.38b	7.79±0.10c	8.92	
亮氨酸 Leu	18.27±0.72c	21.67±0.15a	20.10±0.95b	17.98±0.10c	8.84	
苯丙氨酸 Phe	12.27±0.88b	14.16±0.73a	12.96±0.54ab	11.73±0.27b	8.22	
苏氨酸 Thr	7.94±0.67a	8.85±0.21a	8.89±0.34a	8.40±0.75a	5.24	
赖氨酸 Lys	7.05±0.50a	7.79±0.41a	7.33±0.30a	7.13±0.76a	4.52	

随追氮量的增加呈现先升高后降低的趋势，且在 N₈₀ 时达到最大值，分别为 21.67 和 14.16 mg/g，且显著高于 N₀ 和 N₂₄₀ 处理。缬氨酸含量在 N₈₀ 处理下达到最大值，为 12.24 mg/g，N₁₆₀ 处理次之，为 11.20 mg/g，且 N₈₀ 处理显著高于 N₀ 处理，与 N₁₆₀ 和 N₂₄₀ 处理差异不显著。

由表 3 可知，追氮量对丙氨酸、胱氨酸和组氨

酸含量无显著影响，对其他非必需氨基酸含量均有显著影响，且从变异系数看，追氮量对谷氨酸、脯氨酸和酪氨酸含量影响较大。其中含量最高的是谷氨酸，为 96.82 mg/g (N₈₀)，N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理显著高于 N₀ 和 N₂₄₀ 处理。除丝氨酸之外，其他非必需氨基酸含量均在 N₈₀ 处理下达到最大值，追氮量 80 kg/hm² 与其他处理相比明显提高了氨基酸含量，

表 3 不同追氮处理对春小麦非必需氨基酸含量的影响

Table 3 Effects of different nitrogen topdressing treatments on non-essential amino acid contents of spring wheat mg/g					
指标 Index	N ₀	N ₈₀	N ₁₆₀	N ₂₄₀	变异系数 Coefficient of variation (%)
天冬氨酸 Asp	12.65±0.53b	14.40±0.77a	13.29±0.69ab	12.70±0.27b	6.13
酪氨酸 Tyr	7.58±0.65b	9.10±0.03a	7.61±0.56b	7.95±0.35b	8.82
丝氨酸 Ser	14.22±0.75c	15.79±0.70ab	14.40±0.97bc	16.54±0.57a	7.32
谷氨酸 Glu	82.87±6.81b	96.82±4.67a	95.10±2.77a	79.08±0.03b	9.97
甘氨酸 Gly	11.46±0.38b	12.55±0.23a	11.84±0.69ab	11.84±0.29ab	3.82
丙氨酸 Ala	10.35±0.16a	11.13±0.38a	11.11±0.65a	10.45±0.92a	3.87
胱氨酸 Cys	3.89±0.25a	4.41±0.19a	4.15±0.68a	3.82±0.20a	6.56
组氨酸 His	6.09±0.50a	6.85±0.08a	6.77±0.93a	6.44±0.04a	5.25
精氨酸 Arg	12.02±0.26b	14.18±0.88a	12.92±0.81ab	12.20±0.65b	7.65
脯氨酸 Pro	28.59±0.56c	34.04±1.35a	30.97±1.07b	27.84±0.15c	9.20
合计 Total	189.72±0.53c	219.27±0.77a	208.16±0.69b	188.86±0.27c	6.84

说明减氮至 80 kg/hm² 有利于氨基酸合成。

2.2.2 对籽粒氨基酸评分的影响 由表 4 可知，籽粒必需氨基酸的评分基本上均随着追氮量的增加而呈现下降的趋势，总体表现为苯丙氨酸+酪氨酸>亮氨酸>蛋氨酸+胱氨酸>苏氨酸>异亮氨酸>缬氨酸>赖氨酸。各追氮处理下小麦籽粒蛋白质中必需氨基酸评分范围在 12~39 之间，且与标准蛋白组分相比，各氨基酸含量均低于其值。各氨基酸评分基本都在 N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理下达到最大值，且 N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理的异亮氨酸评分与 N₀ 处理相比分别增加 20.57% 和 9.56%，与 N₂₄₀ 处理相比分别增加 10.76% 和 8.83%，升幅相对较大。

表 4 不同追氮处理对春小麦必需氨基酸评分的影响

Table 4 Effects of different nitrogen topdressing treatments on essential amino acid scores of spring wheat				
指标 Index	N ₀	N ₈₀	N ₁₆₀	N ₂₄₀
缬氨酸 Val	21.52	24.48	22.40	22.20
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	20.69	22.89	22.66	20.83
异亮氨酸 Ile	19.35	23.33	21.20	19.48
亮氨酸 Leu	26.10	30.96	28.71	25.69
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr	33.08	38.77	34.28	32.80
苏氨酸 Thr	19.85	22.13	22.23	21.00
赖氨酸 Lys	12.82	14.16	13.33	12.96

必需氨基酸不足和过剩都会影响蛋白质品质。氨基酸比值系数 RC=1 说明所测的氨基酸含量与标

准氨基酸含量一致；RC>1 说明所测氨基酸含量较高；RC<1 则表明所测的氨基酸含量较低^[19]。由表 5 可知，与标准模式相比，小麦籽粒苯丙氨酸+酪氨酸含量显著过高，其 RC 值为 1.46~1.54；亮氨酸较高，其 RC 值为 1.16~1.23；缬氨酸含量与标准模式较为接近，其 RC 值为 0.97~1.00，RC 整体上随着追氮量的增加有升有降，变幅较小；蛋氨酸+胱氨酸、异亮氨酸和苏氨酸较低；赖氨酸含量显著不足，RC 值范围仅为 0.56~0.59。

表 5 不同追氮处理对春小麦必需氨基酸 RC 的影响

Table 5 Effects of different nitrogen topdressing treatments on essential amino acid RC of spring wheat				
指标 Index	N ₀	N ₈₀	N ₁₆₀	N ₂₄₀
缬氨酸 Val	0.98	0.97	0.95	1.00
蛋氨酸+胱氨酸 Met+Cys	0.94	0.91	0.96	0.94
异亮氨酸 Ile	0.88	0.92	0.90	0.88
亮氨酸 Leu	1.19	1.23	1.22	1.16
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr	1.51	1.54	1.46	1.48
苏氨酸 Thr	0.91	0.88	0.94	0.95
赖氨酸 Lys	0.58	0.56	0.57	0.59

必需氨基酸指数较高意味着氨基酸组成较为平衡，蛋白质的质量及其利用率也相应较高。由图 3 可知，小麦籽粒蛋白质质量变化趋势表现为随追氮量的增加先增加后降低，在 N₈₀ 处理下达到最大值，在 N₁₆₀ 处理下次之。且必需氨基酸指数在 N₈₀

和 N₁₆₀ 处理下分别比在 N₀ 处理下增加 14.64%和

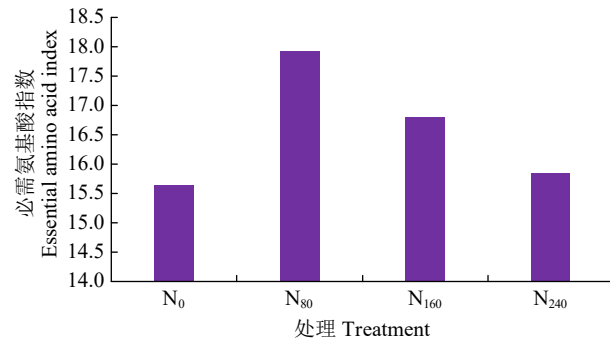


图 3 不同追氮处理对春小麦必需氨基酸指数的影响
Fig.3 Effects of different nitrogen topdressing treatments on essential amino acid index of spring wheat

7.48%，比在 N₂₄₀ 处理下分别增加 13.19%和 6.12%，说明适当减量追氮有利于提高蛋白质质量。

2.2.3 对籽粒矿质元素含量的影响 由表 6 可知，追氮量除对 Mn 的含量没有显著影响之外，对其他 5 种矿质元素含量均有显著影响。Ca、Mg 和 Fe 元素含量均随着追氮量的增加呈现先升高后降低的趋势，且均在 N₈₀ 处理下达到最大值，分别为 429.42、1137.98 和 116.31 mg/kg，比 N₀ 含量分别提高 10.26%、6.02%、90.48%。Cu 和 Zn 含量随追氮量的增加呈先升高后降低的趋势，均在 N₁₆₀ 处理下达到最大值，分别为 6.55 和 46.26 mg/kg，比 N₀ 含量分别提高 21.36%和 31.53%。说明减量追氮有

表 6 不同追氮处理对春小麦矿质元素含量的影响

Table 6 Effects of different nitrogen topdressing treatments on mineral element contents of spring wheat mg/kg

指标 Index	N ₀	N ₈₀	N ₁₆₀	N ₂₄₀
Ca	389.46±11.36b	429.42±1.29a	417.26±10.08a	410.77±15.36a
Mg	1073.32±6.73c	1137.98±4.43a	1121.31±6.68b	1115.29±2.44b
Fe	61.06±3.99d	116.31±4.74a	83.67±6.52b	72.30±4.43c
Mn	36.70±3.85a	37.34±0.94a	38.59±3.24a	38.78±4.85a
Cu	5.40±0.08b	6.49±0.44a	6.55±0.45a	6.12±0.45ab
Zn	35.17±0.15b	38.46±0.05b	46.26±3.60a	37.39±4.65b

利于提高春小麦矿质元素含量。

2.3 追氮量对春小麦产量的影响

由图 4 可知，追施氮肥可显著提高春小麦产量，N₈₀ 处理的产量最高，为 6802.07 kg/hm²，N₁₆₀ 处理次之，为 6658.73 kg/hm²，两者差异不显著，均显著高于 N₀ 和 N₂₄₀ 处理。因此追氮量 80~160 kg/hm² 利于提高春小麦产量，即较常规生产施氮量适当减少施氮量能够提高产量。

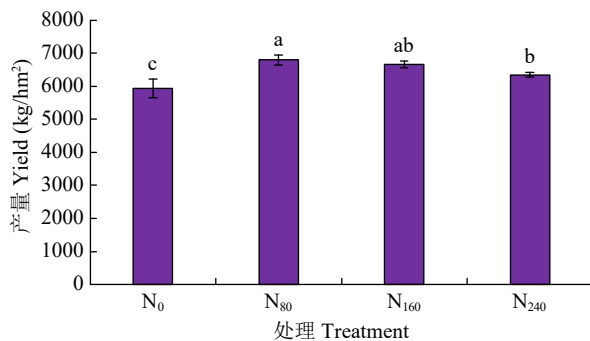


图 4 不同追氮处理对春小麦籽粒产量的影响
Fig.4 Effects of different nitrogen topdressing treatments on yield of spring wheat

3 讨论

3.1 追氮量对春小麦养分吸收利用的影响

氮、磷、钾是植物必需的三大营养元素，直接

影响作物产量和品质^[20]。钾同时参与渗透调节、光合作用和物质运输等多种生理过程^[21]。研究^[22]表明，施用氮肥可提高小麦对土壤磷、钾素的吸收，并且能显著提高小麦地上部磷、钾素积累量。赵俊晔等^[23]研究了施氮量对冬小麦氮磷钾养分吸收利用的影响，结果表明在施氮处理下的磷、钾素积累量高于不施氮处理，而且增加施氮量不仅促进生育前期小麦植株对钾素的吸收积累，在生育后期还降低了植株内钾素的损失，这与本研究结果一致。管亚玲^[24]研究认为，氮肥的增施对冬小麦磷素和钾素的吸收利用具有显著的提高作用，随施氮量增加，总吸磷量显著增加，当氮肥施用量继续增加超过 240 kg/hm² 时，总吸磷量变化不显著。龙素霞等^[25]研究认为，减施氮肥不仅降低了冬小麦在各生育期的钾积累量，而且降低了成熟期的磷积累量，与本研究结果不完全相同。本研究表明，在生育前期，磷素和钾素积累量均随追氮量的增加而上升，而在生育后期，植株磷、钾积累量在 N₈₀ 和 N₁₆₀ 处理显著高于 N₂₄₀ 处理，说明过量追氮会影响植株生育后期对磷、钾素的积累。这可能是由于小麦类型不同以及小麦基因型的差异导致。赵富林^[6]研究认为，不同品种之间磷素累积差异显著，并且不同品种之

间钾素收获指数和钾素籽粒生产效率变化同样存在差异。史辛凯等^[26]研究认为,同一氮肥处理下泰农 18 号的氮肥农学效率小于临麦 4 号,可见不同品种对氮肥的敏感程度不同。

3.2 追氮量对春小麦营养品质的影响

小麦籽粒的营养品质受氨基酸含量、氨基酸含量的平衡性以及蛋白质含量共同的影响,其中必需氨基酸是关键的影响因素^[27]。研究^[28-29]发现,蛋白质中必需氨基酸含量低于非必需氨基酸含量,其中谷氨酸占小麦籽粒蛋白的大部分。Zhang 等^[30]研究发现,施氮后冬小麦籽粒中的蛋白质和氨基酸总量均显著增加,本研究结果与其类似。本研究表明,氨基酸总量随着追氮量的增加呈现升高的趋势,且 N_{80} 和 N_{160} 处理显著高于 N_0 处理。同时氮肥施用量对调控小麦籽粒氨基酸含量起到关键作用^[31-32]。韩立杰等^[33]研究认为,在 $0\sim 225\text{ kg/hm}^2$ 施氮水平间,增加氮肥施用量可以改善冬小麦的籽粒品质。刘莹等^[34]研究发现,在黑土条件下,施用氮肥可以提高春小麦籽粒氨基酸总量、必需氨基酸和非必需氨基酸的含量,且在施氮水平为 120 kg/hm^2 处理下氨基酸总量最高,但是各处理间差异不显著。Zhang 等^[35]研究发现,与施氮水平 180 kg/hm^2 相比, 240 kg/hm^2 处理冬小麦籽粒中蛋白质、必需氨基酸、非必需氨基酸含量及氨基酸总量显著增加,但在施氮水平 300 kg/hm^2 时,这些指标没有进一步增加。徐凤娇等^[36]研究表明,对于不同品质类型的冬小麦而言,在 $0\sim 270\text{ kg/hm}^2$ 施氮范围内,增加施氮量可以提高籽粒产量和蛋白质含量,但超过此范围后,继续增加施氮量则会导致产量和蛋白质含量下降。本研究获得类似的结果,小麦籽粒中必需氨基酸、非必需氨基酸含量及氨基酸总量在 N_{80} 处理达到最大值, N_{160} 处理次之, N_{240} 与 N_0 处理没有显著差异。这表明在 N_{80} 和 N_{160} 处理下足以满足小麦对土壤中氮素的吸收需求,并维持小麦籽粒中蛋白质的积累。Millward^[37]研究发现,在必需氨基酸中,赖氨酸、色氨酸和蛋氨酸是小麦籽粒中限制性最强的氨基酸。本研究也证明,赖氨酸在所有必需氨基酸中评分最低,在各追氮处理下均为籽粒蛋白质第一限制性氨基酸。

肥料的种类、施入方式等是决定籽粒矿质元素含量的重要因素。氮是作物所需的主要营养元素之一,其对调节籽粒的矿质元素含量也具有重要作用^[38]。对于大多数的小麦品种而言,施氮对提高小

麦矿质元素的含量具有显著影响^[39]。前人^[40-41]研究表明,施氮处理下,籽粒 Zn、Fe、Cu 的含量高于不施氮处理,在一定范围内施氮量的增加可以提高籽粒微量元素含量,但超过一定范围后,继续增加施氮量则会导致籽粒微量元素含量下降。同时,不同种类的矿质元素对适宜施氮量的需求存在差异。另外,罗付香等^[42]发现,不同肥力条件下小麦籽粒微量元素受氮肥施用量的影响不同,低肥力时,适当增施氮肥可以提高小麦籽粒中 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素的含量;中和高肥力时,适当增施氮肥提高了籽粒中铁的含量,但降低了 Mn、Zn、Al 和 Cu 的含量。本研究结果表明,各追氮处理下,籽粒的矿质元素含量均高于不施氮处理,并且在本试验肥力条件下, Ca、Mg 和 Fe 元素含量在 N_{80} 处理下达到最大值; Cu 和 Zn 元素含量在 N_{160} 处理下达到最大值。因此,除了小麦品种和环境因素之外,施肥的合理性也是影响小麦营养品质的一个重要因素。

3.3 追氮量对春小麦产量的影响

由于品种、环境和施肥方式等条件的不同,前人对小麦最适宜的氮肥施用量的研究结果有一定的差异。田中伟等^[43]研究发现,不同小麦品种的籽粒产量随着施氮量的增加通常会先升高,达到一个峰值后会逐渐降低。王玲玲等^[44]认为,不同施氮量下小麦籽粒产量之间存在显著差异,随着施氮量的增加小麦籽粒产量先升高,当施氮量 180 kg/hm^2 时,2 种供试的弱筋冬小麦品种的籽粒产量均达到峰值,继续增加施氮量,小麦籽粒产量则会逐渐降低。安婷婷等^[45]对冬小麦研究发现,兼顾产量与施肥效益时的最佳施氮量为 240 kg/hm^2 。代丽婷等^[46]研究发现,春小麦施氮量在 90 kg/hm^2 时产量最高,但与施氮量 82 kg/hm^2 无显著差异,且施氮量 82 kg/hm^2 时单位面积穗数最高。本研究结果与前人研究结果的规律基本一致,在 N_{80} 处理下产量达到最大值, N_{160} 处理下次之,且 N_{80} 和 N_{160} 处理显著高于 N_0 和 N_{240} 处理。结果表明适宜的追氮量有利于增加小麦的产量,但当追氮量超出适宜范围时,则会产生相反的效果,导致产量减少。因此,在试验区域,较常规生产田适当减少追氮量有利于提高产量。

4 结论

与常规生产田相比,适当减量追氮可提高春小

麦成熟期磷素积累量并且降低生育后期钾素的损失,有利于小麦植株对养分的吸收与利用,最终达到提高产量的目的。同时,可以提高必需氨基酸、非必需氨基酸含量和氨基酸总量,有利于氨基酸的合成,提高蛋白质质量。减氮至 $N_{80} \sim N_{160}$ 时,有利于春小麦籽粒积累矿质元素,改善小麦籽粒品质,达到高产优质的目的。综合分析得出,追氮量为 $80 \sim 160 \text{ kg/hm}^2$ 时,小麦养分吸收利用效果与品质最好,是冀东地区春小麦生长的适宜追氮量。

参考文献

- [1] 张文霞,李盼,殷文,等. 麦后复种绿肥及配施不同水平氮肥对小麦产量、品质及氮素利用的影响. 中国农业科学, 2023, 56(17): 3317-3330.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2116-2125.
- [4] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 化肥减施下有机替代对小麦产量和养分吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1768-1781.
- [5] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [6] 赵富林. 施氮量对不同年代小麦品种抗倒伏性、产量和品质的影响. 郑州: 河南农业大学, 2023.
- [7] 杨晓玲,玉素甫江·玉素音,胡雨彤,等. 氮素用量对哈密巴里坤地区春小麦生长、养分吸收及肥料利用率的影响. 新疆农业大学学报, 2022, 45(2): 158-164.
- [8] 代新俊,夏清,杨珍平,等. 氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响. 水土保持学报, 2018, 32(3): 289-294.
- [9] 郑志松,王晨阳,牛俊义,等. 水肥耦合对冬小麦籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 788-793.
- [10] 蔡艳,郝明德. 黄土高原长期施肥对小麦籽粒蛋白质营养品质的影响. 核农学报, 2013, 27(9): 1378-1384.
- [11] 介晓磊,杨先明,刘世亮,等. 潮土长期定位施肥对小麦生理特性、产量及面粉品质的影响. 华北农学报, 2011, 26(3): 157-163.
- [12] 赵艳,罗铮,杨丽,等. 氮肥运筹对稻茬小麦氮素转运、干物质积累、产量及品质的影响. 麦类作物学报, 2022, 42(8): 1001-1011.
- [13] Xu Z Y, Yu Z W, Zhao J Y. Theory and application for the promotion of wheat production in China: past, present and future. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(10): 2339-2350.
- [14] Nemat A, Noureldin H S, Saady F, et al. Grain yield response index of bread wheat cultivars as influenced by nitrogen levels. Annals of Agricultural Sciences, 2013, 58(2): 147-152.
- [15] 代新俊,杨珍平,陆梅,等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5): 710-720.
- [16] 陆晴,马宏亮,吴志会,等. 冀东地区节水高产绿色春小麦栽培技术. 现代农村科技, 2020(9): 13-14.
- [17] 高雪慧,刘强,王钧. 基于 APSIM 模型的陇中旱地春小麦产量对播期、施氮和降水量变化的响应模拟. 麦类作物学报, 2022, 42(3): 371-379.
- [18] 高新,汪辉霖,朱泰武,等. 不同施氮量对春小麦灌浆速率和产量的影响. 新疆农业科学, 2024, 61(2): 310-317.
- [19] 蔡艳,郝明德. 长期轮作对黄土高原旱地小麦籽粒蛋白质营养品质的影响. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1354-1360.
- [20] 鲁艳红,廖育林,聂军,等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应. 土壤学报, 2017, 54(6): 1471-1485.
- [21] 谷贺贺,李静,张洋洋,等. 钾肥与我国主要作物品质关系的整合分析. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1749-1757.
- [22] 龚明强,张枫,顾帅娣,等. 氮磷钾肥配施对小麦产量的影响. 现代农业科技, 2018(19): 23-27.
- [23] 赵俊晔,于振文,李延奇,等. 施氮量对小麦氮磷钾养分吸收利用和产量的影响. 西北植物学报, 2006, 26(1): 98-103.
- [24] 咎亚玲. 氮磷对旱地冬小麦产量,养分利用及籽粒矿质营养品质的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [25] 龙素霞,李芳芳,石书亚,等. 氮磷钾配施对小麦植株养分吸收利用和产量的影响. 作物杂志, 2018(6): 96-102.
- [26] 史辛凯,于振文,赵俊晔,等. 施氮量对高产小麦光合特性、干物质积累分配与产量的影响. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 713-721.
- [27] Chaudhary N, Dangi P, Khatkar S B. Assessment of molecular weight distribution of wheat gluten proteins for chapatti quality. Food Chemistry, 2016, 19928-19935.
- [28] Jonathan R. Co-ordinated expression of amino acid metabolism in response to N and S deficiency during wheat grain filling. Journal of Experimental Botany, 2008, 59(13): 3675-3689.
- [29] Penas E, Martinez C, Frias J. Protein quality of traditional rye breads and ginger cakes as affected by the Incorporation of flour with different extraction rates. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2013, 63(1): 5-10.
- [30] Zhang M W, Ma D Y, Wang C Y. Responses of amino acid composition to nitrogen application in high and low protein wheat cultivars at two planting environments. Crop Science, 2016, 56(3): 1277-1287.
- [31] 刘慧,王朝辉,李富翠,等. 不同麦区小麦籽粒蛋白质与氨基酸含量及评价. 作物学报, 2016, 42(5): 768-777.
- [32] Chen C C, Han G Q, He H Q, et al. Yield, protein and remobilization of water soluble carbohydrate and nitrogen of three spring wheat cultivars as influenced by nitrogen input. Agronomy Journal, 2011, 103(3): 786-795.
- [33] 韩立杰,董伟欣,张月辰. 不同水肥处理对小麦冠层结构、产量和籽粒品质的影响. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 953-962.
- [34] 刘莹,王德梅,常旭虹,等. 施氮量对黑土条件下春小麦品质的影响. 中国农学通报, 2018, 34(23): 19-25.
- [35] Zhang P P, Ma G, Wang C Y. Effect of irrigation and nitrogen application on grain amino acid composition and protein quality in winter wheat. PLoS ONE, 2017, 12(6): e0178494.
- [36] 徐凤娇,赵广才,田奇卓,等. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 300-306.
- [37] Millward D. Amino acid scoring patterns for protein quality assessment. British Journal of Nutrition, 2012, 108 (增 2): 31-43.
- [38] 郝虎林,魏幼璋,杨肖娥,等. 供氮水平对稻株铁、锰、铜、锌含量和稻米品质的影响. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 411-416.
- [39] 姜丽娜,郑冬云,蒿宝珍,等. 氮肥对小麦不同品种籽粒微量元素含量的影响. 西北农业学报, 2009, 18(6): 97-102.

- [40] 方保停, 张胜全, 王敏, 等. 节水栽培条件下冬小麦籽粒微量元素和蛋白质含量对施氮的反应. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 97-101.
- [41] 黄玉芳, 叶优良, 赵亚南, 等. 施氮量对豫北冬小麦产量及籽粒主要矿质元素含量的影响. 作物杂志, 2019(5): 104-108.
- [42] 罗付香, 林超文, 庞良玉, 等. 氮肥运筹对不同小麦品种籽粒微量元素含量和产量的影响. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 695-701.
- [43] 田中伟, 樊永惠, 殷美, 等. 长江中下游小麦品种根系改良特征及其与产量的关系. 作物学报, 2015, 41(4): 613-622.
- [44] 王玲玲, 吴文革, 李瑞, 等. 施氮量对弱筋小麦籽粒品质与氮素利用的影响. 浙江农业学报, 2021, 33(5): 777-784.
- [45] 安婷婷, 侯小畔, 周亚男, 等. 氮肥用量对小麦开花后根际土特性和产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3352-3648.
- [46] 代丽婷, 刘宁涛, 车京玉, 等. 氮肥用量对春小麦灌浆特性、产量及其构成因素的影响. 黑龙江农业科学, 2022(5): 29-33.

Effects of Reduction of Nitrogen Topdressing Application on Phosphorus and Potassium Fertilizer Utilization and Quality of Spring Wheat in Eastern Hebei Province

Wang Jiatong, Ma Yingchen, Feng Yanfei, Lu Jiahui,
Guo Zhenqing, Li Xueli, Li Yun, Han Yucui, Lin Xiaohu

(College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology/
Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract In order to examine the effects of nitrogen reduction on the utilization of phosphorus and potassium fertilizers as well as in spring wheat in eastern Hebei, we utilized spring wheat Jinqiang 11 as the material and set four nitrogen fertilizer levels (0, 80, 160, 240 kg/ha, denoted by N_0 , N_{80} , N_{160} , N_{240} , respectively) with reference to the conventional nitrogen application for wheat planting in the production (N_{240} kg/ha) to analyze the effects of nitrogen reduction on the phosphorus and potassium accumulations, amino acid contents, mineral element contents, and yields of spring wheat plants in eastern Hebei. The results showed that, nitrogen reduction increased phosphorus accumulation in the late reproductive stage, and the phosphorus accumulation at maturity was 45.68 kg/ha at N_{80} , significantly higher than that at N_{160} and N_{240} ; Nitrogen reduction decreased potassium loss at the late reproductive stage, and the loss at maturity was 36.45% compared with that at flowering, which was significantly lower than N_{160} and N_{240} . When nitrogen was reduced to N_{80} and N_{160} , the contents of essential and non-essential amino acids and the total amount of amino acids were significantly higher than that of N_0 and N_{240} treatments, which favored amino acid synthesis. All amino acid scores basically reached the maximum values under N_{80} and N_{160} treatments; the essential amino acid index reached the maximum value under N_{80} treatment, followed by N_{160} treatment, which were increased by 14.64% and 7.48% respectively, compared to N_0 treatment, and increased by 13.19% and 6.12% compared with those under N_{240} treatment, respectively. That was, nitrogen-reduction of N_{80} and N_{160} could improve protein quality. Nitrogen-reduction of N_{80} and N_{160} resulted in higher Ca, Mg, Fe, Cu and Zn mineral elements, which could improve mineral element content of spring wheat. The yields of nitrogen-reduction treatments of N_{80} and N_{160} were considerably higher than those of N_0 and N_{240} treatments, and there was no significant difference between N_{80} and N_{160} . Considering the above factors, the optimum amount of nitrogen applied to spring wheat planted in eastern Hebei is recommended to be 80-160 kg/ha.

Key words Spring wheat; Phosphorus and potassium accumulation; Amino acids; Mineral element; Quality