

施氮量对小麦籽粒主要矿质元素含量的影响和有效性分析

王云江^{1,2} 王玉莹¹ 刘畅^{1,2} 敬雪妍^{1,2} 羊辰^{1,2} 孙彩霞³ 王春平^{1,2}

(¹河南科技大学农学院, 471000, 河南洛阳; ²神农种业实验室, 450000, 河南郑州; ³博爱县农业机械技术中心, 454000, 河南焦作)

摘要 探究不同环境下小麦品种的最佳施氮量, 为提升小麦籽粒矿质元素含量提供科学依据。以 15CA73、济麦 22、中麦 255 和中麦 578 为材料, 在河南安阳、安徽合肥、山东潍坊和聊城 4 个环境设置 5 种氮处理: 不施氮 (N_0)、基施纯氮 45 kg/hm^2 +拔节期追施纯氮 45 kg/hm^2 (N_{45+45})、基施纯氮 90 kg/hm^2 +拔节期追施纯氮 90 kg/hm^2 (N_{90+90})、基施纯氮 135 kg/hm^2 +拔节期追施纯氮 135 kg/hm^2 ($N_{135+135}$) 以及基施纯氮 180 kg/hm^2 +拔节期追施纯氮 180 kg/hm^2 ($N_{180+180}$)。结果表明, 籽粒中 K 和 P ($r=0.72$)、Zn 和 Cu ($r=0.69$) 等元素含量间相关系数较高, 达极显著水平 ($P<0.01$)。与 N_0 处理相比, $N_{180+180}$ 处理下潍坊试验点小麦籽粒中 Ca、Cu、Mg 和 S 含量在各环境中最高, 分别提高了 11.06%、10.78%、0.15% 和 7.83%, $N_{135+135}$ 处理下潍坊试验点 Zn 含量最高, 提高了 46.01%。与 N_0 处理相比, $N_{180+180}$ 处理下中麦 255 籽粒 Cu、Fe、Mg、Mn 和 S 含量在各参试品种中最高, 分别提高了 2.42%、3.50%、1.65%、4.23% 和 16.10%; $N_{135+135}$ 处理下中麦 255 籽粒 Zn 含量最高, 提高了 13.26%。综上, 增施氮肥提高了小麦籽粒 Ca、Cu、Fe、Mn、S、Mg 和 Zn 含量, K 含量受施氮量影响较小, P 含量有下降趋势; 同时降低了 P/Mg、P/Fe 和 P/Zn 值, 使籽粒中 Mg、Fe 和 Zn 的生物有效性得到进一步提升。在安阳、合肥、聊城和潍坊试验点种植小麦推荐的最佳氮肥处理分别为 $N_{135+135}$ 、 N_0 、 $N_{180+180}$ 和 $N_{180+180}$ 。15CA73 和济麦 22 的最佳氮肥处理为 N_0 , 中麦 255 和中麦 578 的最佳氮肥处理为 $N_{180+180}$ 。

关键词 小麦; 施氮量; 籽粒; 矿质元素; 生物有效性

黄淮海麦区作为我国小麦的主产区, 占全国小麦总产量约 70%, 在保障国家粮食安全方面发挥着重要作用^[1]。前人^[2]研究表明, 尽管当前小麦产量相较过去有了显著提升, 但籽粒中主要矿质元素含量却呈减少趋势。Fe、Cu 和 Zn 等主要矿质元素含量不仅与小麦籽粒的营养品质直接相关, 还与人类饮食健康紧密关联^[3]。籽粒中矿质元素缺乏以及生物有效性较低, 尤其是 Fe 和 Zn 的不足, 已成为部分人口面临“隐性饥饿”的主要原因^[4]。

小麦是我国北方地区民众的主要食物和矿质元素等营养物质来源^[5]。提高或改善小麦籽粒中主要矿质元素的含量, 是解决“隐性饥饿”问题的关键途径之一。合理施用氮肥对提升作物籽粒矿质元素含量具有积极作用。研究^[6-7]表明, 合理施氮能够增强作物对矿质元素的吸收能力, 进而提高籽粒中主要矿质元素的含量。张盼盼^[8]以豫麦 49-198 为试验材料, 采用两因素裂区设计研究了不同施氮量对小麦矿质元素积累的影响, 发现施氮可明

显提高小麦茎、穗和籽粒中的 Zn 含量, 其中籽粒 Zn 含量提升了 8.9%。Svecnjak 等^[9]研究表明, 施氮使小麦籽粒中 Fe、Zn、Mn 和 Cu 的含量分别增加了 14.0%、9.2%、19.7% 和 13.2%。Dolijanović 等^[10]通过盆栽试验, 发现减少氮肥施用量不会降低小麦籽粒中的常量元素含量, 而且与高施氮量的小麦相比, 低氮处理对 Cu、Fe 和 Zn 等元素的积累具有积极影响。王子健^[11]研究表明, 随着施氮量的增加, 小麦籽粒中 Ca、Fe 和 Zn 等矿质元素的含量显著上升, 而 Mg 含量显著降低。

综上, 施氮量对小麦籽粒中矿质元素含量的影响随环境条件改变而有所差异。鉴于此, 为探究不同环境下小麦品种的最佳施氮量, 本研究选取 15CA73、济麦 22、中麦 255 和中麦 578 为供试材料, 在黄淮海麦区的 4 个试验点分别设置 5 种不同的氮处理, 通过研究不同氮处理下小麦籽粒中主要矿质元素含量的变化情况, 旨在明确不同环境的最佳施氮量, 为黄淮海麦区小麦营养强化生产提供科学合理的栽培理论依据。

作者简介: 王云江, 主要从事小麦遗传育种研究, E-mail: 19837960589@163.com

王春平为通信作者, 主要从事小麦种质创新与分子遗传育种研究, E-mail: chunpingw@163.com; 孙彩霞为共同通信作者, 主要从事作物生产技术推广工作, E-mail: baslx0715@126.com

基金项目: 河南省重大科技专项 (231100110300); 神农种业实验室“一流课题”项目 (SN01-2022-01)

收稿日期: 2024-08-13; 修回日期: 2024-09-27; 网络出版日期: 2025-03-13

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

于 2019 年 10 月-2020 年 6 月在黄淮海冬麦区北片的河南安阳 (36°09' N, 114°34' E)、山东潍坊 (36°69' N, 119°09' E) 和聊城 (36°46' N, 115°94' E), 以及黄淮海冬麦区南片的安徽合肥 (31°74' N, 117°28' E) 4 个地点开展试验。该地处于半干旱、半湿润地区, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 区域多年平均日照时数 2300~2800 h, ≥ 10 °C 积温 3800~5300 °C, 年降水量 500~900 mm, 土壤类型主要为潮土、褐土和砂姜黑土, 能较好地满足作物生产需求。

1.2 试验设计

供试材料为 15CA73、济麦 22、中麦 255 和中麦 578, 由中国农业科学院作物科学研究所提供。共设置 5 个不同的施氮水平, 分别为不施氮 (N₀)、基施纯氮 45 kg/hm²+拔节期追施纯氮 45 kg/hm² (N₄₅₊₄₅)、基施纯氮 90 kg/hm²+拔节期追施纯氮 90 kg/hm² (N₉₀₊₉₀)、基施纯氮 135 kg/hm²+拔节期追施纯氮 135 kg/hm² (N₁₃₅₊₁₃₅) 以及基施纯氮 180 kg/hm²+拔节期追施纯氮 180 kg/hm² (N₁₈₀₊₁₈₀), 试验采用随机区组设计, 3 次重复, 小区面积为 10 m², 行长 2 m, 行间距 20 cm。试验区基施磷肥 [Ca(H₂PO₄)₂·H₂O] 750 kg/hm² 和钾肥 (K₂SO₄) 180 kg/hm², 小麦生育期田间管理措施一致。

1.3 测定项目与方法

参照 Ren 等^[12]的方法测定矿质元素含量, 在小麦成熟后人工收获脱粒, 随机选取正常籽粒约

5 g, 将封装纸袋放置在烘箱内于 65 °C 条件下烘 24 h, 烘干样品用碳化钨球磨仪 (Retsch MM400, 德国) 粉碎, 获得全麦粉, 称取干燥的全麦粉 0.2 g 置于微波消化罐中, 加入 5 mL HNO₃ (优级纯), 将消化罐放入微波消解仪 (Multiwave PRO, 中国) 中消解完全, 冷却后定容至 25 mL。使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Agilent 5110 ICP-OES, 美国) 测定 Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、P、S 和 Zn 的含量。测定时要确保多色器温度为 35 °C, 检测器 Peltier 温度为-40 °C; 确保测定样品清澈, 无氟离子; 换气时, 确保等离子体流量设为 12 L/min, 辅助气流量设为 1 L/min, 气压表 0.6 MPa 左右; 测定完毕, 关机前冲洗进样系统。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 16.0 软件进行数据处理与分析, 采用 Origin 2024 软件作图。

2 结果与分析

2.1 试验点、品种、施氮量及其交互作用对小麦籽粒矿质元素含量的影响

由表 1 方差分析 *F* 值可知, 试验点对小麦籽粒中各矿质元素含量的影响均达极显著水平, 品种和施氮量对各矿质元素含量的影响达极显著或显著水平; 试验点与品种的交互作用对小麦籽粒中除 Mn 元素外其他 8 种矿质元素含量的影响达极显著或显著水平, 试验点与施氮量的交互作用对各矿质元素含量的影响均达极显著水平, 品种与施氮量的交互作用对 Ca、K、Mg 和 P 含量的影响达极显著或显著水平; 三者交互作用对小麦籽粒中除 Mn 元

表 1 试验点、品种、施氮量及其交互作用对小麦籽粒矿质元素含量的影响
Table 1 Effects of test site, variety, N application rate and their interaction on mineral element content in wheat grain

处理 Treatment	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	S	Zn
试验点 Test site (T)	1317.28**	755.47**	39.67**	389.40**	200.55**	363.12**	149.81**	1564.35**	204.32**
品种 Variety (V)	58.60**	68.04**	270.35**	179.12**	82.39**	5.26*	115.98**	165.51**	2.94*
施氮量 N application rate (N)	7.13**	6.30**	32.31**	24.62**	8.96**	2.60*	10.49**	496.65**	48.50**
试验点×品种 T×V	11.40**	4.75**	11.07**	28.97**	6.45**	1.39	8.27**	2.08*	11.35**
试验点×施氮量 T×N	40.73**	17.93**	17.64**	14.31**	5.10**	4.12**	9.94**	41.09**	25.24**
品种×施氮量 V×N	2.29**	1.65	1.10	2.95**	1.97*	0.79	2.01*	1.24	1.41
试验点×品种×施氮量 T×V×N	2.78**	2.63**	2.43**	2.46**	2.61**	0.93	2.38**	2.27**	2.53**

“*” 和 “**” 分别表示影响显著 (*P* < 0.05) 和极显著 (*P* < 0.01)。

“*” and “**” indicate significant (*P* < 0.05) and extremely significant (*P* < 0.01) effects, respectively.

素外其他 8 个元素含量的影响均达极显著水平。

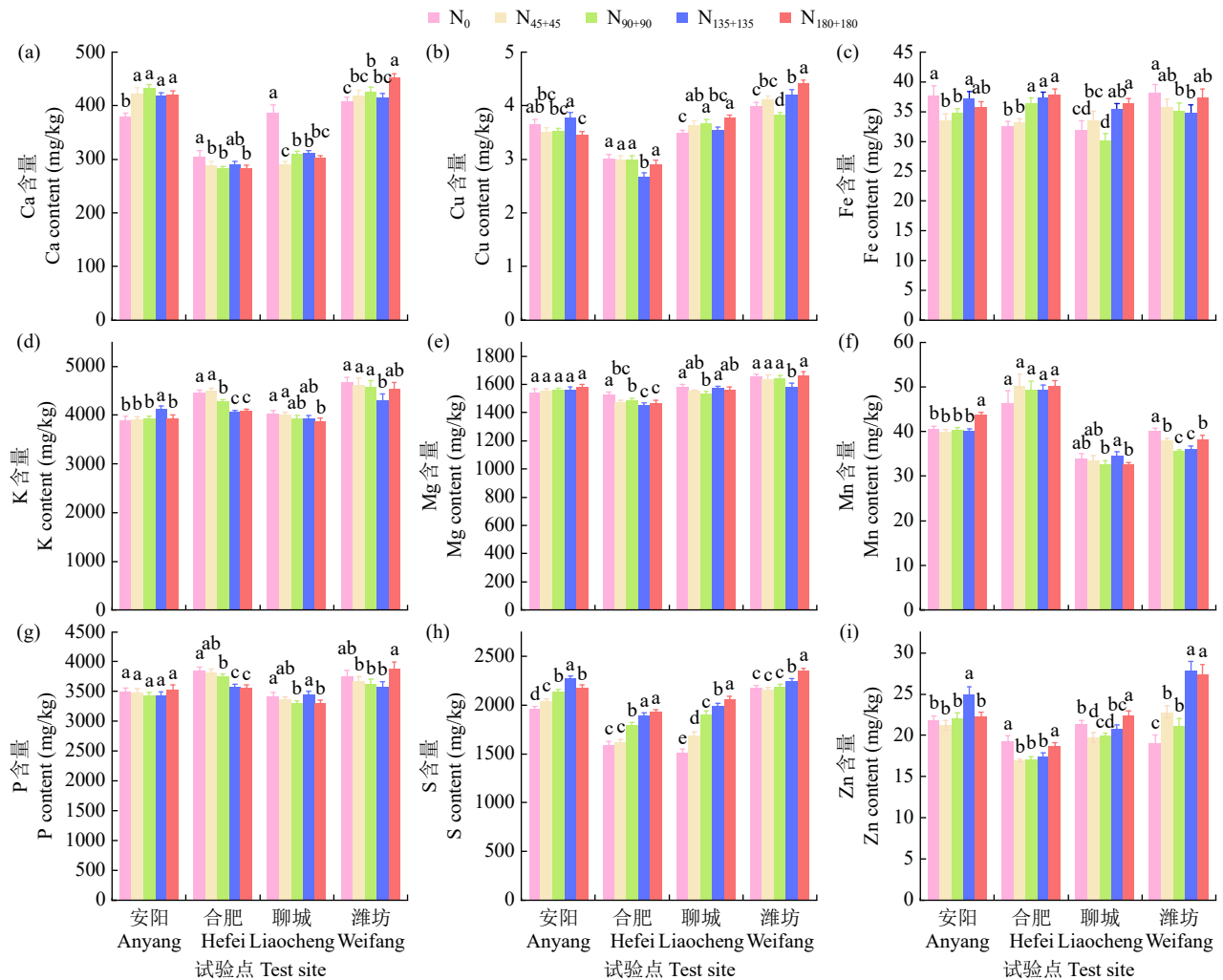
2.2 不同施氮量下各环境小麦籽粒矿质元素含量

如图 1 所示, 在安阳和潍坊试验点, 小麦籽

粒中 Ca 含量在施氮量增加后有所提高, 显著高于 N₀ 处理, 其中潍坊试验点 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下最高, 较 N₀ 处理显著提高 11.06%; 合肥和聊城试验点则是

在 N_0 处理下最高，显著高于 $N_{180+180}$ 处理。在除合肥外的 3 个试验点，Cu 含量均在施氮量增加后有所提高，其中潍坊试验点 $N_{180+180}$ 处理下最高，较 N_0 处理显著提高了 10.78%，聊城和潍坊试验点 $N_{180+180}$ 处理下 Cu 含量显著高于 N_0 处理，安阳试验点 $N_{180+180}$ 处理下则显著低于 N_0 处理，合肥试验点除 $N_{135+135}$ 处理外的各处理间无显著差异。在合肥和聊城试验点， $N_{180+180}$ 处理下 Fe 含量分别较 N_0 处理显著提高了 16.10% 和 14.11%，潍坊试验点 N_0 处理下 Fe 含量最高。各试验点籽粒中 K 和 Mg 含量受施氮量影响相对较小，在安阳、合肥和聊城试验点，Mn 含量在施氮量增加后有所提高，合肥试验点 $N_{180+180}$ 处理下最高，较 N_0 处理提高了 8.18%，聊城试验点 $N_{180+180}$ 处理下则显著低于 N_0 处理。在安阳和潍坊试验点，随着施氮量增加 P

含量呈先降后升的趋势，在合肥和聊城试验点则整体呈降低趋势；其中潍坊试验点 $N_{180+180}$ 处理下 P 含量最高，较 N_0 处理提高了 2.94%，合肥和聊城试验点 $N_{180+180}$ 处理下则显著低于 N_0 处理，安阳试验点各处理间差异不显著。各试验点籽粒中 S 含量随施氮量增加呈升高趋势，与 N_0 处理相比， $N_{180+180}$ 处理分别显著提高了 15.89%、20.76%、36.10% 和 7.83%，各试验点在 $N_{180+180}$ 处理下 S 含量均显著高于 N_0 处理，以潍坊试验点最高。安阳、聊城和潍坊试验点籽粒中 Zn 含量在施氮量增加后有所提高，其中潍坊试验点 $N_{135+135}$ 处理下最高，较 N_0 处理显著提高了 46.01%，安阳试验点在 $N_{135+135}$ 处理下显著高于 N_0 处理，聊城试验点则在 $N_{180+180}$ 处理下显著高于 N_0 处理。各试验点小麦籽粒中 Mn 含量在合肥试验点最高，其他 8 个元素的



不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

图 1 施氮量对不同环境下小麦籽粒矿质元素含量的影响

Fig.1 Effects of N application rate on mineral element content in wheat grain under different environments

含量均在潍坊试验点最高。

2.3 不同施氮量下各品种小麦籽粒矿质元素含量

如图 2 所示，各品种小麦籽粒 S 含量随施氮量增加而增加，N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下中麦 255 的 S 含量最高，较 N₀ 处理显著提高了 16.10%，N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下各品种均显著高于 N₀ 处理。15CA73 和中麦 255 籽粒中 P 含量随施氮量增加呈先减后增的趋势，济麦 22 和中麦 578 则整体呈减少趋势，N₀ 处理下中麦 255 的 P 含量最高，N₀ 和 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下中麦 255 与济麦 22 差异不显著，15CA73 和中麦 578 各处理间差异均不显著。15CA73 和济麦 22 籽粒中 K 含量随着施氮量增加整体呈先增后减的趋势，中麦 578 则随施氮量增加逐渐减少，济麦 22 在 N₄₅₊₄₅ 处理下 K 含量最高，较 N₀ 处理提高了 1.07%，但其各处理间差异均不显著，中麦 255、

中麦 578 和 15CA73 在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下与 N₀ 差异均不显著。各品种小麦籽粒中 Ca 含量随施氮量增加整体呈先减后增的趋势，以 N₀ 处理下中麦 578 含量最高。各品种小麦籽粒中 Cu 含量随施氮量增加有所升高，N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下中麦 255 的 Cu 含量最高，较 N₀ 处理提高了 2.42%。各品种小麦籽粒中 Fe 含量随施氮量增加有所升高，N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下中麦 255 的 Fe 含量最高，较 N₀ 处理提高了 3.50%。N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下中麦 255 籽粒中 Mg 含量最高，较 N₀ 处理提高了 1.65%，其他品种均降低。除济麦 22 以外，其他品种籽粒中 Mn 含量整体在施氮量增加后有所提高，N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下中麦 255 最高，较 N₀ 处理提高了 4.23%。各品种小麦籽粒中 Zn 含量整体在施氮量增加后有所提高，N₁₃₅₊₁₃₅ 处理下中麦 255 最高，较 N₀ 处理提高了 13.26%。

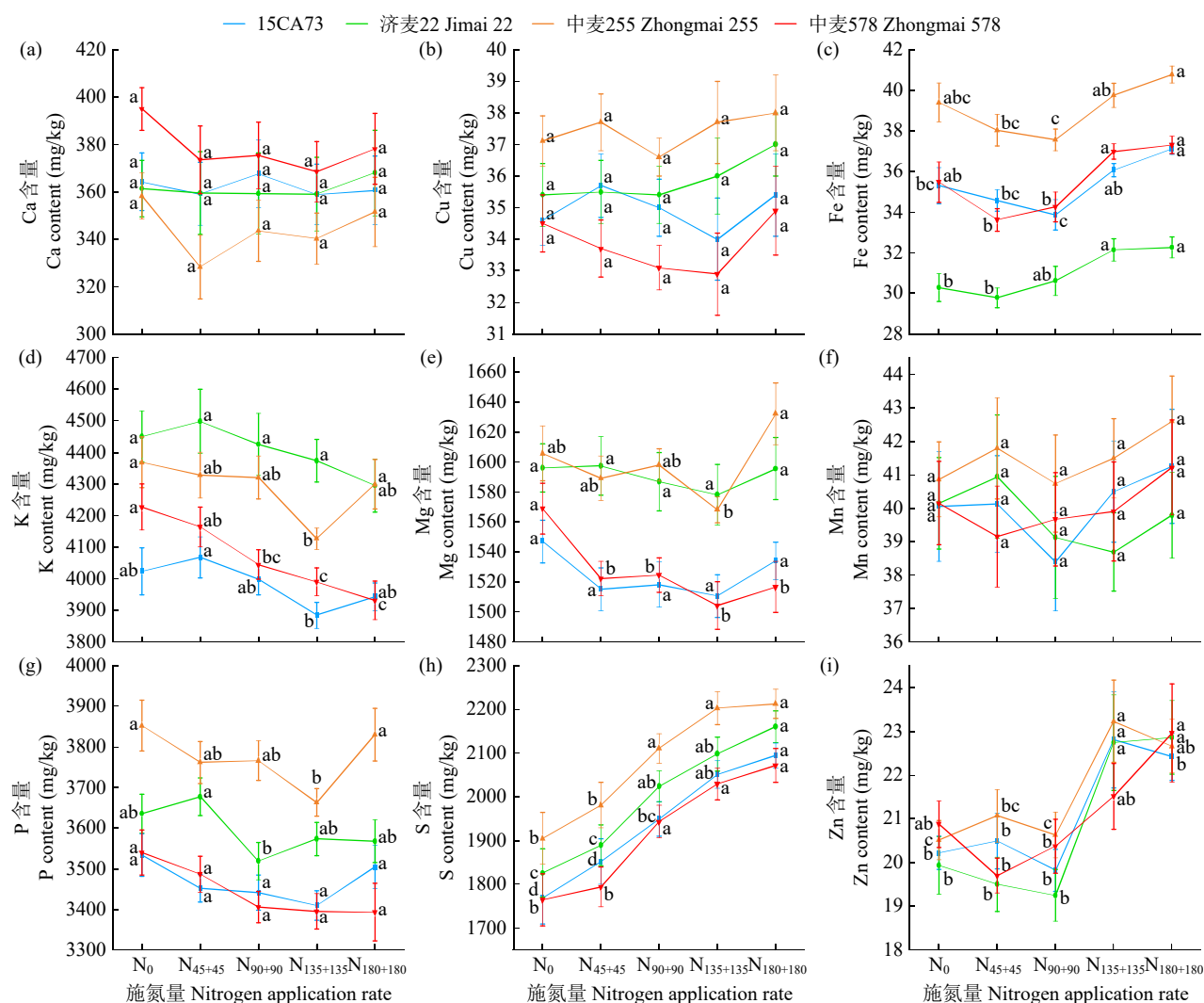


图 2 施氮量对不同品种小麦籽粒矿质元素含量的影响

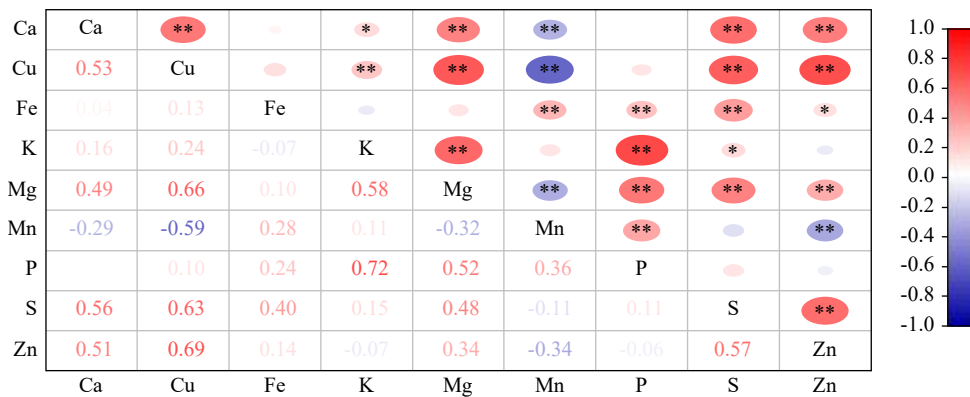
Fig.2 Effects of N application rate on mineral element content in wheat grain of different varieties

各处理下不同小麦品种籽粒中 Ca、Cu 和 Mn 含量差异均不显著；各品种小麦在不同处理间 Fe 和 Zn 含量存在显著性差异；济麦 22 和 15CA73 在各处理下籽粒中 Mg 含量差异均不显著，中麦 578 则在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下 Mg 含量显著低于 N₀ 处理，中麦 255 在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下 Mg 含量显著高于 N₁₃₅₊₁₃₅ 处理。不同品种间小麦籽粒中 Ca、Cu、Fe、Mg、Mn 和 Zn 含量的变异系数依次为 18.72%、14.44%、12.36%、5.48%、17.42%和 17.07%。除中麦 578 的 Ca 含量平均值最高外，其他 5 种矿质元素（Cu、Fe、Mg、Mn 和 Zn）含量的平均值均以中麦 255 最高。

2.4 小麦籽粒矿质元素含量相关性分析

由图 3 可知，Ca 含量与 Cu、K、Mg、S 和 Zn 含量呈显著正相关，而与 Mn 含量呈极显著负相

关，相关系数分别为 0.53、0.16、0.49、0.56、0.51 和-0.29；Cu 含量与 K、Mg、S 和 Zn 含量呈极显著正相关，与 Mn 含量呈极显著负相关，相关系数分别为 0.24、0.66、0.63、0.69 和-0.59；Fe 含量与 Mn、P 和 S 含量呈极显著正相关，与 Zn 含量呈显著正相关，相关系数分别为 0.28、0.24、0.40 和 0.14；K 含量与 Mg 和 P 含量呈极显著正相关，与 S 含量呈显著正相关，相关系数分别为 0.58、0.72 和 0.15；Mg 含量与 P、S 和 Zn 含量呈极显著正相关，与 Mn 含量呈极显著负相关，相关系数分别为 0.52、0.48、0.34 和-0.32；Mn 与 P 含量呈极显著正相关，与 Zn 含量呈极显著负相关，相关系数分别为 0.36 和-0.34；S 与 Zn 含量呈极显著正相关，相关系数为 0.57。K 和 P 含量的相关系数（0.72）最高，其次为 Zn 和 Cu 含量（0.69）、Mg 和 Cu



“*”和“**”分别表示相关性达显著 (P < 0.05) 和极显著 (P < 0.01) 水平。
 “*” and “**” indicate that the correlation reach significant (P < 0.05) and extremely significant (P < 0.01) level, respectively.

图 3 小麦籽粒中矿质元素含量相关分析

Fig.3 Correlation analysis of mineral element content in wheat grains

含量（0.66）。

2.5 小麦籽粒 Ca、Mg、Fe 和 Zn 的生物有效性

小麦籽粒中的 P 易与 Ca、Mg、Fe 和 Zn 形成

植酸盐，P 与各元素含量的比值（P/Ca、P/Mg、P/Fe 和 P/Zn）越低，表明这 4 个元素的有效性越高。由表 2 可知，施氮量增加后各小麦品种籽粒的

表 2 施氮量与品种差异对小麦籽粒 Ca、Mg、Fe 和 Zn 生物有效性的影响

Table 2 Effects of N application rate and variety differences on the bioavailability of Ca, Mg, Fe, and Zn in wheat grains

项目 Item	P/Ca	P/Fe	P/Mg	P/Zn
N ₀	10.13±0.31a	105.96±2.54a	2.31±0.02a	181.58±4.23a
N ₄₅₊₄₅	10.57±0.35a	107.14±2.07a	2.31±0.03a	181.60±4.43a
N ₉₀₊₉₀	10.18±0.34a	104.53±1.61ab	2.27±0.02a	180.06±4.55a
N ₁₃₅₊₁₃₅	10.19±0.29a	97.96±1.67b	2.28±0.02a	162.07±5.02b
N ₁₈₀₊₁₈₀	10.16±0.29a	97.60±1.62b	2.28±0.02a	160.82±3.65b
15CA73	9.88±0.24bc	98.68±1.22b	2.28±0.02b	168.16±3.67a
济麦 22 Jimai 22	10.41±0.31b	116.81±1.55a	2.26±0.02b	178.83±4.80a
中麦 255 Zhongmai 255	11.30±0.28a	97.21±1.33b	2.36±0.02a	178.61±3.93a
中麦 578 Zhongmai 578	9.38±0.23c	98.07±1.71b	2.26±0.02b	167.48±3.71a

不同小写字母表示在 P < 0.05 水平上差异显著。
 Different lowercase letters indicate significant differences at P < 0.05 level.

P/Mg、P/Fe 和 P/Zn 值整体有所降低，与 N₀ 处理相比，N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下 P/Zn 值降幅（11.43%）最大，其次为 P/Fe（7.89%）和 P/Mg（1.30%）。济麦 22 籽粒的 P/Fe 和 P/Zn 值高于其他品种，中麦 255 籽粒的 P/Ca 和 P/Mg 值高于其他品种，中麦 578 籽粒的 P/Ca、P/Mg 和 P/Zn 值均为最低。

3 讨论

3.1 施氮量对不同环境小麦籽粒中主要矿质元素含量的影响

研究^[13]表明，适宜的氮肥施用对作物的生长发育与产量形成具有重要作用。本研究发现，试验点、品种、施氮量及其交互作用均对小麦籽粒中 Ca、K、Mg 和 P 含量产生了显著或极显著影响。Xu 等^[14]发现环境、施氮量与品种的交互作用显著影响小麦籽粒品质性状；张盼盼等^[15]研究表明施氮量与品种的交互作用对玉米籽粒中 P、K、Cu 和 Zn 等元素含量均有显著影响。

本试验中，4 个试验点间各品种小麦在不同施氮量下的籽粒主要矿质元素含量增减不一致，这与前人^[16-17]研究结果一致。不同地区种植的各品种小麦籽粒主要矿质元素含量存在差异，王维等^[18]研究发现，同一小麦品种在山东德州和泰安种植，所得的籽粒中元素含量有所差异，说明其易受到环境条件影响。本研究发现合理施用氮肥可有效提高不同试验点下各品种小麦籽粒中的主要矿质元素含量，与前人^[19-20]研究结果一致。本研究中，聊城试验点小麦籽粒的 Ca、K 和 Mg 含量均在 N₀ 处理下最高，这与张鹏霞^[21]关于减施氮肥会导致小麦籽粒 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量显著降低的结论存在部分差异。此外，张勇等^[22]在相同环境下种植来自 6 个省区的 240 个小麦品种，发现由于遗传背景不同，品种间各矿质元素含量存在明显差异。本研究中合肥试验点的小麦籽粒 Mn 含量最高，达 49.43 mg/kg，鉴于人体 Mn 营养需求为 32.00 mg/kg，建议摄入量控制在 44.00 mg/kg 以下，以避免健康风险^[23]。其他 8 种元素含量的最高值均出现在潍坊试验点，表明潍坊适宜 4 个小麦品种种植，其土壤和环境条件利于矿质元素积累。胡红林等^[24]研究发现，不同地区饲料大麦的矿质元素含量有较大差异，富含有机质土壤的地区含量更

高。本研究对施氮量响应的进一步分析显示出试验点特异性，安阳试验点在 N₁₃₅₊₁₃₅ 处理下各元素含量较高；合肥试验点中，Fe、Mn 和 S 含量在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下最高，而其他元素含量在 N₀ 处理下较高；聊城试验点 Cu、Fe、S 和 Zn 含量在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下最高，而其他元素在 N₀ 处理下达到峰值；潍坊试验点 Fe、K 和 Mn 含量在 N₀ 处理下最高，其他元素含量则在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下较高。

黄玉芳等^[25]研究发现，施氮量对夏玉米籽粒中主要矿质元素含量有显著影响，增施氮肥可显著提高 Ca、Cu、Fe 和 Zn 含量，降低 P 含量，对 Mg 和 Mn 影响不大，与本试验结果基本一致。然而，石吕等^[26]在精米中观察到增施氮肥导致 P、K、Ca 和 Mg 含量显著降低，Fe、Mn、Zn 和 Cu 含量显著增加。本研究中，不同试验点、不同品种小麦籽粒中 Zn 含量对施氮的响应大于 Fe 和 K，此结果与 Jiang 等^[27]的报道相符。关于施氮量对小麦籽粒中 Zn 等矿质营养元素含量的影响已有大量研究^[28-29]，表明不施或施用少量氮肥的小麦，其籽粒 Zn 浓度显著低于最佳施氮量处理，而过量施用氮肥未能显著增加籽粒 Zn 浓度，本研究结果亦证实了这一观点。

本研究中，各小麦品种的 Cu、Fe、Mn、S 和 Zn 含量随施氮量增加有所提高；中麦 255 和中麦 578 籽粒中 Ca 含量随施氮量增加呈先减后增的趋势；各小麦品种籽粒中 K、Mg 和 P 含量则随施氮量增加整体呈减少趋势。除 Ca 和 K 元素外，中麦 255 的其余矿质元素含量均值最高。小麦籽粒中不同矿质元素含量对氮肥的响应存在品种间差异，可能与供试品种的遗传背景有关^[30]。适当提高施氮量可提升作物中主要矿质元素的含量^[31-32]。Erenoglu 等^[33]研究表明，施氮量在 0~360 kg/hm² 时可有效提升小麦籽粒中 Fe 含量。李峰等^[34]同样发现小麦中 Fe 含量随施氮量增加而增加。Salvagiotti 等^[35]研究表明，N 和 S 元素间具有协同作用，即随施氮量增加 S 含量随之增加，与本研究结果一致。然而，也有研究^[36]指出 Mg、Ca、Fe、Zn、Mn 和 Cu 含量随施氮量增加呈先增后减的趋势，或适当减少基肥施氮量可增加水稻籽粒中的主要矿质元素含量^[37]，且在一定范围内降低施氮量不会降低小麦籽粒中大部分矿质元素的含量^[38]。

鉴于当前农业生产中氮肥过量施用导致的环境污染和氮损失问题,本研究旨在探究不影响矿质元素总体含量的条件下,将施氮量优化至最佳水平,以提升其可持续性。基于各试验点和品种对不同元素的特定需求,提出以下针对性施肥建议:15CA73 需补充 Ca、Cu、K、Mg、Mn 和 P 元素时, N₀ 处理为最佳,需补充 Fe、S 和 Zn 元素时, N₁₈₀₊₁₈₀ 处理为最佳;济麦 22 需补充 S 和 Zn 元素时, N₁₈₀₊₁₈₀ 处理为最佳,需补充其他 7 种元素时,推荐 N₀ 处理;中麦 255 需补充 Ca 和 Cu 元素时, N₀ 处理为最佳,需补充其他 7 种元素时,推荐 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理;中麦 578 需补充 Ca、Cu、K、Mg 和 P 元素时, N₀ 处理为最佳,需补充其他 4 种元素时,推荐 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理。综上所述,在安阳、合肥、聊城和潍坊试验点种植小麦推荐最佳氮肥处理分别为 N₁₃₅₊₁₃₅、N₀、N₁₈₀₊₁₈₀ 和 N₁₈₀₊₁₈₀,15CA73 和济麦 22 的最佳氮肥处理为 N₀ 处理,中麦 255 和中麦 578 最佳氮肥处理为 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理。

3.2 小麦籽粒矿质元素含量间的相关性

本研究发现,各矿质元素含量间均呈现出一定的相关性,表明其可能存在一定程度的相互依存关系,与前人^[39-40]研究结果一致。平文静^[41]研究发现,玉米籽粒中 Cu、Fe 和 Zn 含量间存在显著正相关关系,周让让等^[42]也发现小麦籽粒中 Fe 和 Zn 含量呈显著正相关,与本试验结果一致。本研究发现 Mn 含量与 Ca、Cu、Mg 和 Zn 含量间均呈极显著负相关,与前人^[31]研究结果相似。张盼盼等^[43]研究表明,Fe 和 Zn 含量呈显著正相关,可能是由于玉米根部产生的次生氨基酸类物质可同时螯合土壤中难溶性的 Fe 或 Zn,且 Fe 和 Zn 的吸收与利用高度同步,进而表现出明显的协同效应,与本试验研究结果相符。前人^[44]研究表明,小麦籽粒的 Ca 含量与 Zn、Fe、S、P、Mg 和 Mn 含量呈显著正相关,与本试验部分结果一致。

3.3 施氮量对小麦籽粒中 Ca、Mg、Fe 和 Zn 生物有效性的影响

禾谷类作物籽粒中全磷的 65%~90%以植酸磷形式存在,植酸磷和谷类作物中的 Ca、Mg、Fe 和 Zn 元素具有较高的亲和力,易形成难以被人和动物吸收的植酸盐,因此,P/Zn 和 P/Fe 等指标常被用于评价这些元素的有效性^[45]。本研究发现,不同

小麦品种籽粒中 P/Ca、P/Mg、P/Fe 和 P/Zn 的变异系数分别为 7.35%、10.00%、2.18% 和 7.49%。其中,中麦 578 与其他品种相比,籽粒中 Ca、Mg 和 Zn 元素的生物有效性最佳。研究^[46]表明,施氮可提升矿质元素的生物有效性;蔺江韵等^[47]研究表明,施氮可显著降低土壤 pH,提高土壤中 Fe 和 Mn 元素的生物有效性,促进小麦对 Fe 元素的吸收及向籽粒的分配,进而提高籽粒 Fe 含量;左毅等^[48]同样发现,施氮能显著提高籽粒中 Fe 的有效性;研究^[49]表明,施氮能够增加玉米籽粒中 Ca、Mg、Fe 和 Zn 的生物有效性。本研究发现,随着施氮量增加,各小麦籽粒的 P/Mg、P/Fe 和 P/Zn 值有所降低,表明与不施氮肥相比,施氮处理不仅能提高小麦籽粒中 Mg、Fe 和 Zn 的含量,还能提高这些元素的生物有效性。

4 结论

在 N₁₈₀₊₁₈₀ 处理下,潍坊试验点小麦主要矿质元素含量综合表现优于其他 3 个试验点;中麦 255 籽粒中各矿质元素含量综合表现优于其他 3 个品种。在安阳、合肥、聊城和潍坊试验点种植小麦推荐的最佳氮肥处理分别为 N₁₃₅₊₁₃₅、N₀、N₁₈₀₊₁₈₀ 和 N₁₈₀₊₁₈₀。15CA73 和济麦 22 的最佳氮肥处理为 N₀,中麦 255 和中麦 578 的为 N₁₈₀₊₁₈₀。施用氮肥不仅能够提高小麦籽粒中 Mg、Fe 和 Zn 的含量,同时也可以提高这些元素的生物有效性。

参考文献

- [1] 崔振坤,于振文,石玉,等.水氮运筹对小麦光合物质生产和产量的影响.应用生态学报,2024,35(6):1564-1572.
- [2] 刘美佳,韩证仿,杨世佳,等.氮肥用量对苏中冬小麦地上部主要矿质元素含量的影响.麦类作物学报,2012,32(4):728-733.
- [3] Bouis H E. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost?. Proceedings of the Nutrition Society, 2003, 62(2): 403-411.
- [4] Muthayya S, Rah J H, Sugimoto J D, et al. The global hidden hunger indices and maps: an advocacy tool for action. PLoS ONE, 2013, 8(6): e67860.
- [5] 刘水苗,关小康,刘长硕,等.适宜耕作模式提高黄淮海平原冬小麦产量并改善土壤水肥状况.农业工程学报,2023,39(18):82-91.
- [6] Guo S, Chen Y H, Chen X C, et al. Grain mineral accumulation changes in Chinese maize cultivars released in different decades and the responses to nitrogen fertilizer. Frontiers in Plant Science, 2020, 10: 1662.
- [7] 常旭虹,赵广才,王德梅,等.生态环境与施氮量协同对小麦籽粒微量元素含量的影响.植物营养与肥料学报,2014,20(4):

- 885-895.
- [8] 张盼盼. 氮钾施用对小麦矿质元素积累分配和籽粒品质的调控效应. 郑州: 河南农业大学, 2017.
- [9] Svecnjak Z, Jenel M, Bujan M, et al. Trace element concentrations in the grain of wheat cultivars as affected by nitrogen fertilization. *Agricultural and Food Science*, 2013, 22(4): 445-451.
- [10] Dolijanović Ž, Roljević Nikolić S, Kovačević D, et al. Mineral profile of the winter wheat grain: effects of soil tillage systems and nitrogen fertilization. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(5): 11757-11771.
- [11] 王子健. 华北地区滴灌施肥对小麦-玉米籽粒矿质元素含量和品质的影响. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [12] Ren P X, Zhao D H, Zeng Z K, et al. Pleiotropic effect analysis and marker development for grain zinc and iron concentrations in spring wheat. *Molecular Breeding*, 2022, 42(9): 49.
- [13] 刘跃, 贾永红, 于月华, 等. 北疆氮肥运筹对花生生长发育、产量及品质的影响. *作物杂志*, 2024(3): 119-126.
- [14] Xu K J, Zhang Z X, Tian W F, et al. Comparative analysis of yield and quality traits in two elite Chinese wheat varieties under varied nitrogen fertilizations and environmental conditions. *Cereal Chemistry*, 2024, 101(5): 1139-1149.
- [15] 张盼盼, 乔江方, 李川, 等. 氮钾配施对不同锌效率玉米品种植株矿质元素累积、分配的影响. *河南农业科学*, 2024, 53(6): 1-10.
- [16] Velu G, Singh R P, Crespo-Herrera L, et al. Genetic dissection of grain zinc concentration in spring wheat for mainstreaming biofortification in CIMMYT wheat breeding. *Scientific Reports*, 2018, 8: 13526.
- [17] 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.
- [18] 王维, 郭红, 于慧, 等. 富含有益矿质元素小麦种质资源的筛选及育种利用. *粮油食品科技*, 2021, 29(2): 15-24.
- [19] 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.
- [20] Ajiboye B, Cakmak I, Paterson D, et al. X-ray fluorescence microscopy of zinc localization in wheat grains biofortified through foliar zinc applications at different growth stages under field conditions. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 357-370.
- [21] 张鹏霞. 不同氮钾处理下小麦籽粒矿质元素相关性状的 QTL 分析. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [22] 张勇, 王德森, 张艳, 等. 北方冬麦区小麦品种籽粒主要矿物质元素含量分布及其相关性分析. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1871-1876.
- [23] Shi M, Wang X S, Wang H L, et al. High phosphorus fertilization changes the speciation and distribution of manganese in wheat grains grown in a calcareous soil. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147608.
- [24] 胡红林, 国政. 不同地区饲料大麦矿物质元素含量的比较分析. *中国饲料*, 2023(18): 16-19.
- [25] 黄玉芳, 叶优良, 陈文莉, 等. 氮肥用量对玉米籽粒主要矿质元素质量分数的影响. *西北农业学报*, 2020, 29(6): 870-876.
- [26] 石吕, 薛亚光, 魏亚凤, 等. 不同氮素粒肥水平下精米蒸煮食味品质变化及其与矿质元素含量相关性分析. *作物杂志*, 2019(6): 57-65.
- [27] Jiang L N, Ma J L, Wang X J, et al. Grain zinc and iron concentrations of Chinese wheat landraces and cultivars and their responses to foliar micronutrient applications. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(2): 532-541.
- [28] Xia H Y, Wang L, Qiao Y T, et al. Elucidating the source-sink relationships of zinc biofortification in wheat grains: a review. *Food and Energy Security*, 2020, 9(4): e243.
- [29] Xue Y F, Zhang W, Liu D Y, et al. Nutritional composition of iron, zinc, calcium, and phosphorus in wheat grain milling fractions as affected by fertilizer nitrogen supply. *Cereal Chemistry*, 2016, 93(6): 543-549.
- [30] 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.
- [31] 马红艳, 聂兆君, 刘红恩, 等. 施氮量和施磷方式对冬小麦产量和籽粒矿质元素积累的影响. *河南农业科学*, 2022, 51(5): 10-22.
- [32] 薛艳芳. 氮肥管理对高产小麦和玉米锌吸收、转移与累积的影响. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [33] Erenoglu E B, Kutman U B, Ceylan Y, et al. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc (^{65}Zn) in wheat. *New Phytologist*, 2011, 189(2): 438-448.
- [34] 李峰, 田霄鸿, 陈玲, 等. 栽培模式、施氮量和播种密度对小麦籽粒中锌、铁、锰、铜含量和携出量的影响. *土壤肥料*, 2006(2): 42-46.
- [35] Salvagiotti F, Castellarin J M, Miralles D J, et al. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crops Research*, 2009, 113(2): 170-177.
- [36] 袁继超, 刘从军, 俄胜哲, 等. 施氮量和穗粒肥比例对稻米营养品质及中微量元素含量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 183-187, 200.
- [37] 郭晓红, 姜红芳, 王鹤瓔, 等. 氮肥运筹对寒地水稻籽粒植酸、蛋白质和矿质元素的影响. *核农学报*, 2020, 34(7): 1534-1542.
- [38] 李晓靖. 氮肥和前茬作物对小麦籽粒产量和氮、钾等矿质营养元素累积的影响. 济南: 山东师范大学, 2023.
- [39] Graham R D, Welch R M, Bouis H E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps. *Advances in Agronomy*, 2001, 70(1): 77-142.
- [40] 孙宪印, 田枫, 米勇, 等. 小麦重组自交系群体籽粒主要矿质元素含量的分析. *麦类作物学报*, 2016, 36(7): 872-877.
- [41] 平文静. 玉米锌铁元素吸收分配的研究及相关性状的 QTL 定位. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [42] 周让让, 刘韬, 陈红, 等. 青海富硒地区 31 份小麦新品系硒、铁、锌含量分析. *分子植物育种*, 2022, 20(8): 2725-2732.
- [43] 张盼盼, 乔江方, 李川, 等. 氮钾配施对夏玉米籽粒矿质元素含量和累积量的影响. *华北农学报*, 2023, 38(3): 87-99.
- [44] 刘玉秀, 黄淑华, 王景琳, 等. 小麦籽粒钙元素含量的研究进展. *作物学报*, 2021, 47(2): 187-196.
- [45] Ryan M H, McNerney J K, Record I R, et al. Zinc bioavailability in wheat grain in relation to phosphorus fertiliser, crop sequence and mycorrhizal fungi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(7): 1208-1216.
- [46] Xia H Y, Xue Y F, Liu D Y, et al. Rational application of fertilizer nitrogen to soil in combination with foliar Zn spraying improved Zn nutritional quality of wheat grains. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 677.
- [47] 蔺江韵, 尹本酥, 王星舒, 等. 长期施氮条件下小麦铁锰累积及其与土壤养分的关系. *中国农业科学*, 2023, 56(17): 3372-3382.

[48] 左毅, 马冬云, 王晨阳, 等. 花后叶面喷施氮肥和锌肥对小麦粒重及营养品质的影响. 麦类作物学报, 2013, 33(1): 123-128.

[49] 王吉. 生物炭对稻田土壤微量元素有效性的影响及作用机制. 扬州: 扬州大学, 2023.

Effects of Nitrogen Application Rate on Major Mineral Element Content and Bioavailability in Wheat Grains

Wang Yunjiang^{1,2}, Wang Yuying¹, Liu Chang^{1,2}, Jing Xueyan^{1,2},
Yang Chen^{1,2}, Sun Caixia³, Wang Chunping^{1,2}

¹College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China;

²The Shennong Laboratory, Zhengzhou 450000, Henan, China;

³Bo'ai County Agricultural Machinery Technology Center, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract To explore the optimal nitrogen application rate for different wheat varieties in various environments and provide a scientific basis for enhancing the mineral element content in wheat grains, this study used 15CA73, Jimai 22, Zhongmai 255, and Zhongmai 578 as experimental materials. Five nitrogen application treatments were established across four environments: Anyang (Henan), Hefei (Anhui), Weifang (Shandong), and Liaocheng (Shandong). These treatments included no nitrogen application (N_0), basal application of 45 kg/ha pure nitrogen + topdressing of 45 kg/ha pure nitrogen at the jointing stage (N_{45+45}), basal application of 90 kg/ha pure nitrogen + topdressing of 90 kg/ha pure nitrogen at the jointing stage (N_{90+90}), basal application of 135 kg/ha pure nitrogen + topdressing of 135 kg/ha pure nitrogen at the jointing stage ($N_{135+135}$), and basal application of 180 kg/ha pure nitrogen + topdressing of 180 kg/ha pure nitrogen at the jointing stage ($N_{180+180}$). The results showed highly and extremely significant correlation coefficients ($P < 0.01$) between the contents of elements such as K and P ($r = 0.72$), and Zn and Cu ($r = 0.69$) in grains. Compared with the N_0 treatment, the $N_{180+180}$ treatment resulted in the highest contents of Ca, Cu, Mg, and S in wheat grains at the Weifang site across all environments, with increases of 11.06%, 10.78%, 0.15%, and 7.83%, respectively. The Zn content at the Weifang experimental site was highest under the $N_{135+135}$ treatment, showing a 46.01% increase compared to the N_0 treatment. Furthermore, compared with the N_0 treatment, the $N_{180+180}$ treatment led to the highest contents of Cu, Fe, Mg, Mn, and S in Zhongmai 255 grains among all tested varieties, with increases of 2.42%, 3.50%, 1.65%, 4.23%, and 16.10%, respectively. The Zn content in Zhongmai 255 grains was the highest under the $N_{135+135}$ treatment, increasing by 13.26% compared to N_0 treatment. In summary, increased nitrogen application enhanced the contents of Ca, Cu, Fe, Mn, S, Mg, and Zn in wheat grains. K content was less affected by nitrogen application, while P content showed a declining trend. Concurrently, the P/Mg, P/Fe, and P/Zn ratios decreased, further improving the bioavailability of Mg, Fe, and Zn in the grains. Therefore, the recommended optimal nitrogen fertilizer treatments for wheat cultivation at the experimental sites are $N_{135+135}$ for Anyang, N_0 for Hefei, $N_{180+180}$ for Liaocheng, and $N_{180+180}$ for Weifang. Moreover, N_0 is determined to be the optimal nitrogen fertilizer treatment for 15CA73 and Jimai 22, whereas $N_{180+180}$ is optimal for Zhongmai 255 and Zhongmai 578.

Key words Wheat; Nitrogen application rate; Grain; Mineral element; Bioavailability