

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51049

氮磷减施对不同强筋小麦品种产量和品质及其土壤生物学特性的影响

许倍铭** 郝紫瑞** 冯健超 马耕 王丽芳 谢迎新 王晨阳 马冬云*

河南农业大学农学院 / 国家小麦工程技术研究中心, 河南郑州 450046

摘要: 为明确氮、磷减施对强筋小麦品种产量、品质及其土壤生物学特性的影响, 本研究在大田条件下, 以科兴 3302、豫州 118 和新麦 26 为试验材料, 于 2021—2024 年冬小麦生长季在河南开展氮、磷肥减施试验, 分别设置常规施肥(N/P₂O₅/K₂O: 240/135/135 kg hm⁻²)、减施氮肥(2021—2022 年度为不施 N, P₂O₅/K₂O 按常规; 2022—2024 年度为常规施 N 处理下减施 30%, P₂O₅/K₂O 按常规)、减施磷肥(2021—2022 年度为不施 P₂O₅, N/K₂O 按常规; 2022—2024 年度常规施 P₂O₅ 处理下减施 30%, N/K₂O 按常规)。结果表明, (1) 土壤特性方面: 第 1 年度减施氮、磷肥对土壤全氮、全磷和有机质含量没有显著影响, 而第 2 年度减氮处理下成熟期根际土壤全氮、全磷含量均显著低于常规施肥。减施氮、磷肥处理下土壤硝态氮和铵态氮含量、脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性均表现下降, 其中减氮处理较常规施肥显著下降。(2) 产量及其构成: 在减施磷肥处理下 3 个强筋小麦产量与常规施肥相比差异不显著, 但减氮处理第 1 年度产量与常规施肥之间无显著差异, 第 2~3 年度则较常规施肥显著下降。减施氮、磷肥主要通过穗数的降低影响产量, 其中减氮对产量的影响效应大于减磷, 且随着年际的增加, 影响效应加大。(3) 加工品质: 减施磷肥处理下, 多数小麦品种加工品质仍符合强筋或中强筋小麦标准, 而减施氮肥处理下各品种蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值多呈显著下降趋势, 其中蛋白质含量平均下降 0.85 个百分点, 沉降值降低 4.49 mL, 减施氮肥的影响效应大于减施磷肥。综上, 在本试验生态环境和土壤肥力条件下, 从保障产量、品质和提升肥料生产效率的层面而言, 第 1 年度不施氮肥、第 2 年度减氮 30% 可以在稳定产量、品质的基础上, 使氮肥偏生产力平均提高 26.24%; 第 1 年度不施磷肥、第 2~3 年度减磷 30%, 则相应使磷肥偏生产力平均提高 34.45%。

关键词: 小麦; 氮肥减施; 磷肥减施; 土壤生物学特性; 产量

Effects of nitrogen and phosphorus reduction on grain yield, quality, and soil biological properties in strong-gluten wheat varieties

Xu Bei-Ming**, Hao Zi-Rui**, Feng Jian-Chao, Ma Geng, Wang Li-Fang, Xie Ying-Xin, Wang Chen-Yang, and Ma Dong-Yun*

College of Agronomy, Henan Agricultural University / National Engineering Research Center for Wheat, Zhengzhou 450046, Henan, China

Abstract: To evaluate the effects of nitrogen (N) and phosphorus (P) reduction on grain yield, quality, and soil biological properties in strong-gluten wheat varieties, a three-year field experiment (winter wheat seasons from 2021 to 2024) was conducted in Henan province using three cultivars: Kexing 3302, Yuzhou 118, and Xinmai 26. The experimental design included four treatments: (1) conventional fertilization (CF: N/P₂O₅/K₂O = 240/135/135 kg hm⁻²), (2) nitrogen reduction (RN: no N application in 2021–2022, and 30% N reduction relative to CF in 2022–2024, with P and K maintained at CF levels), and (3) phosphorus reduction (RP: no P application in 2021–2022, and 30% P reduction in 2022–2024, with N and K maintained at CF levels). Results indicated that N and P reductions had no significant effects on soil total N (TN), total P (TP), or organic matter content in the first

本研究由国家重点研发计划项目(2021YFF1000203)和河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2024JD18)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFF1000203) and the Postgraduate Education Reform and Quality Improvement Project of Henan Province (YJS2024JD18).

* 通信作者(Corresponding author): 马冬云, E-mail: xmzxmdy@126.com

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 许倍铭, E-mail: xbm970915@163.com; 郝紫瑞, E-mail: haozirui789@163.com

Received (收稿日期): 2025-05-20; Accepted (接受日期): 2025-09-10; Published online (网络出版日期): 2025-09-24.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20250924.1229.006>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

year. However, under RN treatment, TN and TP at maturity were significantly lower than those under CF during the 2022–2023 growing season. Both N and P reductions decreased soil nitrate-N and ammonium-N concentrations. Soil enzyme activities (urease, invertase, and phosphatase) showed declining trends under nutrient reduction, with RN causing significantly greater reductions than CF. P reduction had no significant effect on yield across all three varieties, while N reduction had no impact in the first year but led to significant yield losses in the second and third years. These losses were primarily due to reduced spike numbers, with RN having a more pronounced negative effect than RP, which intensified over time. Grain processing quality under RP generally met the standards for strong- or medium-strong gluten wheat, whereas RN significantly reduced protein content (by 0.85%) and sedimentation value (by 4.49 mL) compared to CF. The negative impact of RN on quality parameters was greater than that of RP. Under current agroecological and soil fertility conditions, omitting N fertilizer in the first year and applying a 30% N reduction in the second year maintained grain yield and quality while increasing N partial factor productivity by an average of 26.24%. Similarly, omitting P in the first year and applying a 30% P reduction in the second and third years stabilized yield and quality while improving P partial factor productivity by an average of 34.45%. These findings offer empirical support for optimizing fertilizer strategies in strong-gluten wheat production systems.

Keywords: wheat; reduction of nitrogen fertilizer; reduction of phosphate fertilizer; soil biological properties; yield

小麦是我国的主要粮食作物和人民生活的主要口粮,提高小麦产量对于保障国家粮食安全具有重要意义。氮、磷素是农作物生长必不可少的营养元素,氮、磷肥的施用对于促进作物增产、改善小麦品质具有重要作用^[1-3]。研究表明,在适量范围内增施氮肥(0~240 kg hm⁻²)可以提高强筋小麦品种的产量,而氮肥过量(480 kg hm⁻²)则产量降低^[4]。长期定位试验表明,与不施磷肥相比,长期施磷的旱地小麦产量平均提高 67%;而使小麦达到高产水平(6141 kg hm⁻²)并维持籽粒较高锌、氮和磷含量的最佳施磷量(P₂O₅)为 94 kg hm⁻²^[3]。对于中筋和强筋小麦品种而言,N(240 kg hm⁻²)、P₂O₅(209 kg hm⁻²)可以在保证较高产量的前提下,同时改善小麦加工品质和营养品质^[2]。

合理施肥是维持作物高产优质的关键,但为了增产盲目加大施肥量并不会同等提高收获产量,不仅会导致环境污染,而且还会引起农产品质量安全等问题^[5-7]。调查表明,目前我国过量施氮、磷现象普遍存在^[8-10]。近年来,为了减少肥料过量施用造成的生态环境问题以及提高资源的高效利用,肥料减施逐渐成为降低农业面源污染和实现农业节本增效的重要途径之一。马永鑫等^[11]认为,在常规施氮(270 kg hm⁻²)基础上减施氮肥 25%节水 20%,可达到高产和水分高效利用的目标^[11]。张琨等^[12]研究表明,在常规施用磷钾肥的基础上,减施氮肥 20% (180 kg hm⁻²)时强筋小麦产量并未显著下降,但蛋白质含量显著降低。而同样减氮 20% (180 kg hm⁻²)对中筋小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值均无显著影响,但减氮 30% (157.5 kg hm⁻²)则相应指标均显著下降^[13]。闫蓉等^[14]研究认为,在黄土高原渭北旱地,施磷量由 P₂O₅ 120 kg hm⁻²减少至

70 kg hm⁻² 仍能够保证土壤磷素供应和小麦生长,维持小麦产量,并提高磷肥利用效率、降低土壤中磷素残留。已有研究表明,在常规施肥的基础上适量减施氮、磷肥可以维持产量、提高肥料利用效率,但对不同小麦加工品质指标的影响并不一致。而氮、磷肥对于强筋小麦品质的形成至关重要;而关于氮、磷肥减施对强筋小麦产量和品质的影响以及氮、磷肥减施下相应的土壤生物学特性还没有详细报道。因此,本研究在河南省高产田常规施肥基础上,探明连续 3 年氮、磷减施条件下强筋小麦产量和品质的变化,并进一步研究其相应的土壤生物学特性,以期小麦高产优质高效栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2021—2024 年在河南省荥阳市赛德育种试验站(34°53'N, 113°27'E)进行定点试验,土壤为潮土,0~20 cm 耕层土壤 pH 为 7.9,有机质含量 13.81 g kg⁻¹、全氮含量 1.07 g kg⁻¹、全磷含量 0.92 g kg⁻¹、有效磷含量 25.61 mg kg⁻¹、速效钾含量 131.61 mg kg⁻¹、碱解氮含量 78.60 mg kg⁻¹,小麦全生育期温度和降雨量见图 1。选用 2 个强筋小麦品种科兴 3302 (Kexing 3302, KX3302)、新麦 26 (Xinmai 26, XM26) 和 1 个强筋小麦品系豫州 118 (Yuzhou 118, YZ118)。3 个肥料处理:常规施肥(CF)、减氮(RN)、减磷(RP)。具体施肥量和施肥方式见表 1。采用裂区设计,肥料为主区,品种为副区,设置 3 次重复,每个小区面积为 14.7 m²。2011—2023 年均于 10 月 18 日播种,分别于 2022 年 6 月 4 日、2023 年 6 月 7 日和 2024 年 6 月 5 日收获。田间管理同当地常规高产田。

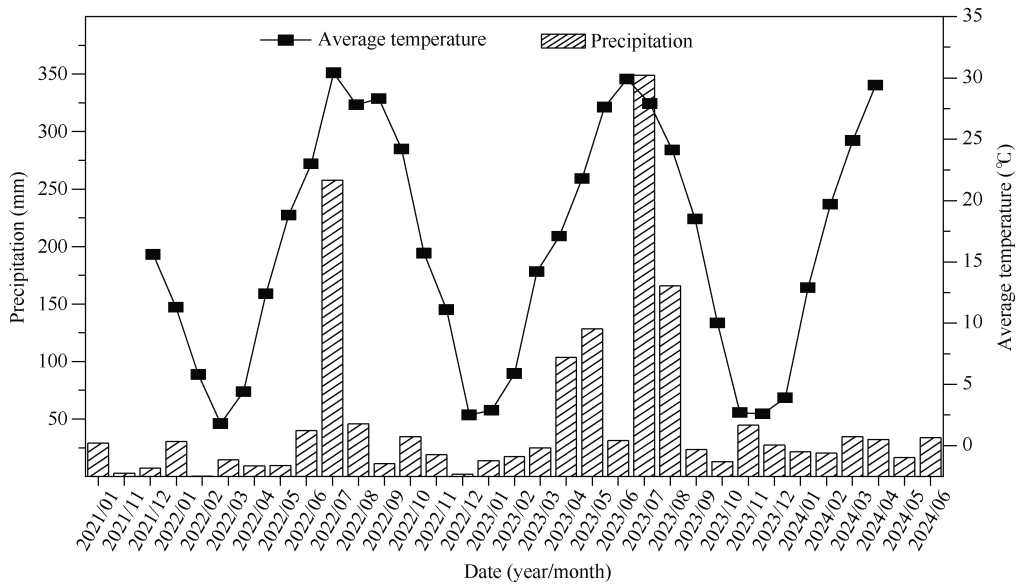


图 1 小麦生长季温度和降水量
Fig. 1 Temperature and precipitation during the wheat growing season

表 1 本试验施肥量和施肥方式
Table 1 Fertilizer application rates and methods used in this study

年份 Year	处理 Treatment	氮肥 Nitrogen (N)		磷肥 Phosphorus (P ₂ O ₅)		钾肥 Potassium (K ₂ O)	
		总量 Amount	施入方式 Method	总量 Amount	施入方式 Method	总量 Amount	施入方式 Method
2021– 2022	常规施肥 CF	240 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	135 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
	减氮处理 RN	0 kg hm ⁻²	—	135 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
	减磷处理 RP	240 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	0 kg hm ⁻²	—	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
2022– 2023	常规施肥 CF	240 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	135 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
	减氮处理 RN	168 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	135 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
	减磷处理 RP	240 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	94.5 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
2023– 2024	常规施肥 CF	240 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	135 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
	减氮处理 RN	168 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	135 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal
	减磷处理 RP	240 kg hm ⁻²	50%基施+50%拔节追施 50% basal+50% topdressing	94.5 kg hm ⁻²	基施 Basal	135 kg hm ⁻²	基施 Basal

CF: conventional fertilization; RN: nitrogen reduction; RP: phosphorus reduction.

1.2 产量三要素及籽粒样品采集

于成熟期取各小区 1 m 双行调查穗数, 同时取 30 个麦穗统计穗粒数。收获 6 m² 样方, 人工脱粒后测定千粒重, 籽粒经过后熟后用于品质分析。

氮(磷)肥偏生产力(kg kg⁻¹)=产量/施氮(磷)量

1.3 土壤样品采集

在返青期、拔节期、开花期和成熟期选取长势一致的植株, 采用 5 点取样法, 挖出 0~20 cm 耕层根

系区土样, 取紧贴在根系表面的土样, 混合后作为根际土, 其中一部分迅速装入自封袋, 液氮处理后放于-80℃冰箱保存, 用于铵态氮和硝态氮含量的测定, 另一部分自然风干后过 1 mm 筛, 用于土壤酶活性测定。

1.4 土壤酶活性测定

参考关松荫^[15]的方法测定土壤酶活性。其中, 采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性; 采

用磷酸苯二钠测定法测定土壤磷酸酶活性;采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性。

1.5 土壤硝态氮和铵态氮测定

取 5 g 新鲜土壤样品,用 50 mL 2 mol L⁻¹ KCl 溶液浸提,浸提液使用紫外分光光度计测定土壤硝态氮含量,采用靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量^[16]。

1.6 土壤养分测定

采用全自动-半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量;采用钼锑抗比色法测定土壤全磷含量;采用重铬酸钾外加热法^[17]测定土壤有机质含量。采用氯仿熏蒸法测定土壤微生物生物量碳和微生物生物量氮含量^[18]。

1.7 籽粒品质指标的测定

采用 FOSS 公司的 Kjeltec 2300 自动定氮仪测定籽粒蛋白含量。采用无锡布勒 LRMM804 (ALBM) 磨粉机对小麦籽粒进行磨粉。采用大成光电所生产的 MJ-III 型面筋数量和质量测定仪测定面粉湿面筋含量。SDS 沉降值的测定:把 50 mL 的 2% 的 SDS 溶液加入到 1 mL 的乳酸母液中(100 mL 85% 乳酸加入到 800 mL 蒸馏水中,回流 6 h),配制成 SDS 乳酸混合液;称取 0.6 g 面粉于 10 mL 试管中,加入 5 mL 的 10 mg L⁻¹ 溴酚蓝溶液,混匀后开始计时,5 min 后

再次振荡混匀后加入 5 mL SDS 乳酸混合液,混匀后计时 10 min,读数。沉降值(mL) = 10 min 观察值×6.8。

1.8 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行试验数据的统计分析;利用 Duncan 法多重比较分析不同肥料处理间的差异性, $P < 0.05$ 为显著性差异;采用 Excel 2016 和 Origin 2021 64Bit 作图。

2 结果与分析

2.1 氮磷减施对不同强筋小麦品种产量及其构成因素的影响

由表 2 可知,2021—2022 年度,3 个小麦品种在减氮(RN)、减磷(RP)条件下籽粒产量与常规施肥(CF)之间差异均未达统计上的显著水平,但总体而言 RP 条件下籽粒产量与 CF 之间产量几乎相当,而 RN 条件下籽粒产量较其 CF 处理下降 439.90~1143.10 kg hm⁻²。从产量构成因素可以看出,与 CF 相比,穗数在 RN、RP 条件下呈降低趋势,而穗粒数和千粒重呈增加趋势;其中 RN、RP 条件下的穗数、穗粒数与 CF 之间的差异均未达统计上的显著水平;而 RN 处理下 KX3302、YZ118 的千粒重显著高于其 CF 条件下千粒重,分别增加 4.78 g 和 7.29 g,表明减施

表 2 氮磷减施对不同小麦品种产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on grain yield and its components in different wheat varieties

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times 10^4$ hm ⁻²)	穗粒数 Kernel per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Grain yield (kg hm ⁻²)
2021—2022	科兴 3302	常规施肥 CF	640.00±57.79 a	40.50±3.70 a	38.50±0.08 b	8486.00±433.86 a
		减磷处理 RP	537.50±45.57 a	47.23±5.06 a	39.22±1.21 ab	8462.85±1377.50 a
		减氮处理 RN	507.50±110.59 a	43.10±6.36 a	43.28±3.47 a	8046.10±1037.87 a
	豫州 118	常规施肥 CF	585.00±109.66 a	38.70±1.75 a	46.50±0.60 c	8945.10±1572.05 a
		减磷处理 RP	568.75±119.87 a	38.37±3.95 a	48.61±0.87 b	9015.51±891.47 a
		减氮处理 RN	447.50±50.18 a	38.13±5.62 a	53.79±0.61 a	7802.00±1016.20 a
	新麦 26	常规施肥 CF	596.25±112.54 ab	43.40±1.97 a	39.00±2.46 a	8578.30±894.12 a
		减磷处理 RP	660.00±104.76 a	47.37±2.45 a	39.19±2.09 a	10,414.73±1000.81 a
		减氮处理 RN	482.50±54.84 b	44.67±3.34 a	43.80±3.14 a	8023.10±573.71 a
	ANOVA			F-value		
	V		0.62	6.31**	63.75***	1.26
	T		7.80**	1.32	20.61***	4.76*
	V×T		1.20	0.58	0.44	1.12
2022—2023	科兴 3302	常规施肥 CF	573.75±40.65 a	43.11±2.67 a	38.40±0.49 a	8073.50±24.92 a
		减磷处理 RP	552.50±88.38 a	44.44±2.48 a	38.92±2.02 a	8121.42±279.60 a
		减氮处理 RN	611.67±100.17 a	39.73±1.20 a	37.47±1.32 a	7739.87±742.32 a
	豫州 118	常规施肥 CF	601.67±101.56 a	39.70±0.57 a	45.00±0.13 ab	9136.46±1332.96 a
		减磷处理 RP	535.00±104.08 a	41.33±0.38 a	46.15±0.87 a	8674.51±1150.29 a
		减氮处理 RN	516.25±15.91 a	40.17±0.70 a	44.27±1.16 b	7802.28±551.34 b

(续表 2)

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	穗数 Spike number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Kernel per spike	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Grain yield (kg hm^{-2})
2022—2023	新麦 26 XM26	常规施肥 CF	602.50±81.31 a	42.07±5.11 a	39.20±1.30 a	8445.01±899.98 a
		减磷处理 RP	563.75±62.07 a	39.97±3.71 a	38.58±1.64 a	7387.70±534.11 ab
		减氮处理 RN	592.50±61.17 a	39.03±0.61 a	36.02±0.51 b	7080.21±453.66 b
	ANOVA			F-value		
	V		0.51	1.85	136.56***	4.24*
	T		1.32	1.86	1.90	3.83*
	V×T		0.72	0.95	5.80**	0.92
2023—2024	科兴 3302 KX3302	常规施肥 CF	712.18±58.87 a	37.86±0.87 a	37.59±0.90 a	8599.84±458.83 a
		减磷处理 RP	654.24±17.15 a	37.76±3.10 a	39.61±1.32 a	8338.03±1022.00 a
		减氮处理 RN	621.43±75.34 a	37.57±4.18 a	36.87±2.27 a	7247.46±417.40 b
	新麦 26 XM26	常规施肥 CF	649.29±98.50 a	42.57±1.05 a	36.60±1.62 a	8559.26±771.34 a
		减磷处理 RP	647.14±94.58 a	39.02±2.67 b	36.40±0.90 a	7754.70±516.79 a
		减氮处理 RN	505.29±69.80 b	40.59±0.90 ab	36.76±0.75 a	6405.83±890.60 b
	ANOVA			F-value		
	V		3.15	6.57*	4.77*	1.88
	T		4.06*	0.83	1.20	8.47**
	V×T		0.81	0.73	1.97	0.44

处理同表 1。V: 品种; T: 处理; V×T: 品种×处理。表中数据为平均值±标准差; 数据后不同字母表示同一品种不同肥料处理下差异显著($P < 0.05$)。*、**、***分别代表在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. V: variety; T: treatment; V×T: variety × treatment. KX3302: Kexing 3302; YZ118: Yuzhou 118; XM26: Xinmai 26. Data are presented as mean ± standard deviation. Different letters within the same variety and column indicate significant differences at $P < 0.05$. *, ** and *** indicate significant differences at $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively.

氮、磷肥主要降低了成穗数, 而穗粒数和千粒重呈增加趋势; 在减施磷肥条件下穗粒数和千粒重的增加一定程度弥补了穗数下降对产量的影响, 而在减施氮肥条件下穗粒数和千粒重的增加不足以弥补穗数下降对产量的影响。

2022—2023 年度不同处理之间产量的变化趋势与 2021—2022 年度相似, 其中 YZ118、XM26 在 RN 处理下的籽粒产量显著低于 CF 处理; 产量构成因素中穗数在 RP、RN 条件下较 CF 均呈下降趋势。

2023—2024 年度不同处理之间产量的变化趋势与 2021—2022 年度和 2022—2023 年度相似; KX3302 和 XM26 在 RP 下产量与其 CF 下的产量差异未达统计上的显著水平, 但总体呈降低趋势, 分别减少 261.81 kg hm^{-2} 和 804.56 kg hm^{-2} ; 而在 RN 下 2 个品种均显著低于相应 CF 下的产量, 分别减少 1352.38 kg hm^{-2} 和 2153.43 kg hm^{-2} 。综合 3 年产量及其构成要素可以看出, 减施氮、磷肥下产量和穗数总体呈下降趋势, 其中减氮对产量的影响效应大于减施磷肥, 且随着年际的增加, 影响效应加大。

RN 处理下的氮肥偏生产力较 CF 处理平均提高 26.24% (2022—2023), 而 RP 处理下的磷肥偏生产力较 CF 处理平均提高 34.45% (2022—2024)。

2.2 氮磷减施对不同强筋小麦品种土壤全氮、全磷和有机质含量的影响

由表 3 可知, 2021—2022 年度 RP 或 RN 处理下土壤全氮含量与 CF 处理的差异多数均未达显著水平, 但拔节期 RN 处理下的全氮含量显著低于 CF 处理; 2022—2023 年度, RN 处理下 KX3302 和 XM26 在成熟期土壤全氮含量均显著低于相应 CF 处理。

2021—2022 年度, 不同品种在 RP 和 RN 条件下的土壤全磷含量较 CF 总体呈下降趋势; 但多数情况下, 与 CF 之间的差异未达统计上的显著水平。2022—2023 年度, RP、RN 处理下 KX3302 的全磷含量均显著低于相应 CF 处理, 整个生育期分别较 CF 处理平均下降 13.00% 和 10.65%; 而 XM26 则在成熟期显著低于 CF 处理, 分别较 CF 下降 15.22% 和 14.13%。2021—2022 年度, RP 处理下土壤有机质含量与 CF 处理之间差异多未达显著水平, 而 RN 处理

下成熟期则多显著低于 CF 处理。2022—2023 年度, 其 CF 平均下降 15.13% 和 3.32%; 而 RN 处理则平均下降 19.09% 和 1.76%。

表 3 氮磷减施对不同小麦品种根际土壤全氮、全磷和有机质含量的影响

Table 3 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on total nitrogen, total phosphorus, and organic matter content in rhizosphere soil

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	全氮 Total N (g kg ⁻¹)			全磷 Total P (g kg ⁻¹)			有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)		
			JS	AS	MS	JS	AS	MS	JS	AS	MS
2021–	科兴 3302	常规施肥	1.35±	1.21±	1.09±	1.02±	1.00±	1.00±	14.34±	14.25±	14.66±
2022	KX3302	CF	0.03 a	0.08 a	0.09 a	0.04 a	0.00 a	0.10 a	0.85 a	1.31 a	0.67 a
		减磷处理	1.20±	1.17±	1.19±	0.99±	0.98±	0.90±	13.67±	13.89±	13.73±
		RP	0.02 b	0.07 a	0.12 a	0.03 a	0.00 a	0.03 a	0.36 a	0.05 a	0.15 ab
		减氮处理	1.13±	1.24±	1.07±	1.01±	0.98±	0.92±	15.19±	13.95±	13.02±
		RN	0.03 c	0.08 a	0.01 a	0.01 a	0.04 a	0.01 a	1.81a	0.50 a	0.96 b
	豫州 118	常规施肥	1.25±	1.24±	1.07±	1.03±	1.10±	0.95±	13.90±	15.04±	14.42±
	YZ118	CF	0.05 a	0.09 a	0.04 a	0.02 a	0.07 a	0.03 a	0.23 b	0.92 a	0.33 a
		减磷处理	1.25±	1.18±	1.16±	1.00±	1.06±	0.88±	14.95±	13.65±	13.22±
		RP	0.03 a	0.03 a	0.01 a	0.01 a	0.02 a	0.02 b	0.16 a	0.20 a	0.22 b
		减氮处理	1.05±	1.13±	1.20±	1.05±	1.07±	0.82±	14.21±	13.37±	13.25±
		RN	0.02 b	0.04 a	0.17 a	0.04 a	0.00 a	0.00 c	0.08 b	1.37 a	0.08 b
	新麦 26	常规施肥	1.18±	1.15±	1.16±	1.00±	1.02±	0.91±	14.42±	13.72±	15.00±
	XM26	CF	0.01 a	0.04 a	0.04 a	0.05 a	0.09 a	0.05 a	0.45 a	0.72 a	0.18 a
		减磷处理	1.13±	1.25±	1.21±	1.03±	0.97±	0.87±	13.75±	13.76±	13.82±
		RP	0.03 b	0.07 a	0.09 a	0.05 a	0.04 a	0.05 a	0.15 b	1.28 a	1.39 a
		减氮处理	1.12±	1.21±	1.17±	0.83±	1.00±	0.90±	14.30±	14.99±	14.14±
		RN	0.02 b	0.01 a	0.08 a	0.10 a	0.02 a	0.04 a	0.14 ab	0.14 a	0.83 a
	ANOVA					F-value					
	V		1.70	0.29	0.43	2.72	9.81**	3.09	0.30	0.07	2.48
	T		6.92**	0.41	1.28	4.22*	1.42	6.47**	0.98	0.95	8.75**
	V×T		3.02*	1.49	0.29	6.82**	0.05	1.31	2.51	2.16	0.49
2022–	科兴 3302	常规施肥	0.83±	1.21±	1.20±	0.86±	0.86±	0.91±	17.57±	21.56±	18.09±
2023	KX3302	CF	0.04 b	0.13 a	0.02 a	0.02 a	0.01 a	0.01 a	0.35 a	3.27 a	1.34 a
		减磷处理	0.86±	1.07±	1.16±	0.79±	0.78±	0.72±	15.67±	15.67±	17.22±
		RP	0.08 b	0.05 a	0.01 a	0.00 b	0.02 b	0.05 b	0.62 b	0.29 b	0.37 a
		减氮处理	0.98±	1.06±	1.03±	0.80±	0.79±	0.76±	15.51±	16.19±	14.59±
		RN	0.02 a	0.09 a	0.04 b	0.03 b	0.02 b	0.00 b	0.29 b	0.61 b	0.16 b
	新麦 26	常规施肥	0.94±	1.08±	1.18±	0.84±	0.83±	0.92±	15.77±	17.54±	16.68±
	XM26	CF	0.07 a	0.06 ab	0.01 a	0.05 a	0.06 a	0.04 a	1.05 a	0.73 a	0.65 a
		减磷处理	0.86±	1.15±	1.13±	0.85±	0.80±	0.78±	15.89±	16.37±	16.07±
		RP	0.01 a	0.02 a	0.04 b	0.03 a	0.02 a	0.00 b	1.58 a	1.11 a	1.01 a
		减氮处理	0.90±	1.05±	1.02±	0.81±	0.82±	0.79±	17.60±	16.21±	15.30±
		RN	0.02 a	0.00 b	0.00 c	0.04 a	0.01 a	0.01 b	0.97 a	0.28 b	0.71 a
	ANOVA					F-value					
	V		0.15	0.32	2.30	1.01	0.58	8.19*	0.15	2.50	2.62
	T		4.64*	2.02	56.71**	2.09	5.24*	64.64**	1.61	10.88**	14.37**
	V×T		5.53*	2.81	0.40	1.78	1.54	1.42	6.61*	4.49*	3.06

处理同表 1。V: 品种; T: 处理; V×T: 品种×处理。JS、AS、MS 分别代表拔节、开花和成熟期。表中数据为平均值±标准差; 数据后不同字母表示同一品种不同肥料处理下差异显著 ($P < 0.05$)。方差分析中*和**分别代表在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. V: variety; T: treatment; V×T: variety × treatment. KX3302: Kexing 3302; YZ118: Yuzhou 118; XM26: Xinmai 26. JS: jointing stage; AS: anthesis stage; MS: maturation stage. Data are presented as mean ± standard deviation. Different letters within the same variety and column indicate significant differences at $P < 0.05$. * and ** indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2.3 氮磷减施对强筋小麦品种根际土壤微生物生物量碳氮的影响

由表 4 可知(表中数据为品种 KX3302), 土壤微生物生物量碳含量以 CF 处理下较高, 而 RP 和 RN 处理下较低; 与相应 CF 处理比较, RP 处理 2 年平均下降 7.61%, RN 处理下则平均下降 6.15%。微生物生物量氮含量则在不同生育时期表现有所差异, RN 处理下的微生物生物量氮在拔节期显著高于相应 CF 处理, 而在开花期则显著低于 CF 处理, 这可能与不同生育时期植株的长势及生长环境有关; 其中 RP、RN 处理下开花期的土壤微生物生物量 N 含量较相应 CF 处理分别下降 3.68%~6.67%和 2.92%~15.64%。微生物生物量 C/N 多表现为 CF 处理下较高, 在 2021—2022 年度, RP 和 RN 处理下微生物生

物量 C/N 在返青和拔节期分别较 CF 处理下降 10.50%和 39.07%、14.09%和 14.61%; 而在 2022—2023 年度, RP 和 RN 处理拔节期微生物生物量 C/N 较 CF 下降 11.78%和 24.75%。

2.4 氮磷减施对不同强筋小麦品种根际土壤硝态、铵态氮含量的影响

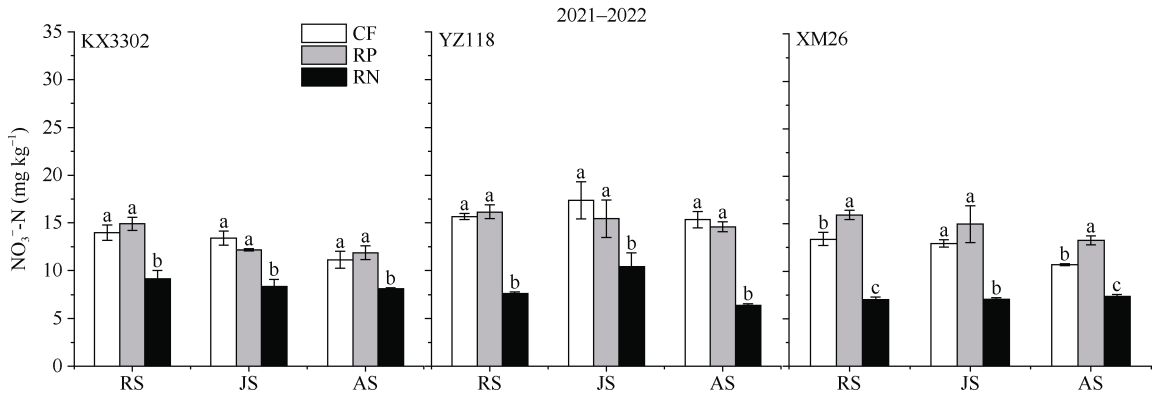
2.4.1 对硝态氮含量的影响 由图 2 可知, 随着小麦生长发育, 土壤硝态氮含量呈逐渐下降趋势。2021—2022 年度, RN 处理下 KX3302、YZ118 和 XM26 土壤硝态氮含量较其相应 CF 处理均显著下降, 分别下降 27.10%~37.68%、39.86%~58.54%和 31.00%~47.63%; RP 处理下的 KX3302 和 YZ118 与其相应 CF 间均没有显著差异, 而 XM26 在返青和开花期较相应 CF 显著升高(18.90%和 24.08%)。

表 4 氮磷减施对小麦根际土壤微生物生物量碳氮的影响
Table 4 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on microbial biomass carbon and nitrogen in wheat rhizosphere soil

年份 Year	处理 Treatment	微生物生物量碳含量 Microbial biomass carbon content			微生物生物量氮含量 Microbial biomass nitrogen content			微生物生物量碳/氮 Microbial biomass C/N		
		(mg kg ⁻¹)			(mg kg ⁻¹)					
		RS	JS	AS	RS	JS	AS	RS	JS	AS
2021—2022	常规施肥	108.76±	122.56±	133.11±	9.81±	12.70±	14.83±	11.90±	9.65±	8.98±
	CF	1.62 a	5.68 a	3.25 a	0.15 b	0.24 b	0.44 a	0.01 a	0.63 a	0.05 a
	减磷处理	105.51±	117.69±	108.76±	9.91±	14.20±	13.84±	10.65±	8.29±	7.86±
	RP	3.25 a	0.81 a	3.25 c	0.39 b	0.40 a	0.16 b	0.09 b	0.17 b	0.15 b
	减氮处理	99.02±	119.72±	122.56±	13.66±	14.54±	12.51±	7.25±	8.24±	9.80±
	RN	1.62 b	1.22 a	0.81 b	0.08 a	0.54 a	0.15 c	0.16 c	0.28 b	0.05 a
2022—2023	常规施肥	131.08±	134.73±	130.43±	14.38±	14.47±	14.37±	9.11±	9.33±	9.07±
	CF	4.46 a	12.99 a	0.82 a	0.23 a	0.31 b	0.07 a	0.16 c	1.10 a	0.01 a
	减磷处理	123.37±	116.88±	128.79±	9.91±	14.20±	13.84±	12.46±	8.23±	9.31±
	RP	1.62 ab	1.62 b	2.46 a	0.39 c	0.40 b	0.16 b	0.33 a	0.12 ab	0.28 a
	减氮处理	120.12±	122.96±	129.61±	12.04±	17.51±	13.95±	9.97±	7.02±	9.30±
	RN	4.87 b	4.46 ab	0.01 a	0.01 b	0.01 a	0.30 b	0.40 b	0.26 b	0.20 a

处理同表 1。RS、JS、AS 分别代表返青期、拔节期和开花期。表中数据为平均值±标准差; 数据后不同字母表示不同肥料处理下差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1. RS: regreening stage; JS: jointing stage; AS: anthesis stage. Data are presented as mean ± standard deviation. Different letters within the same column indicate significant differences at $P < 0.05$.



(图 2)

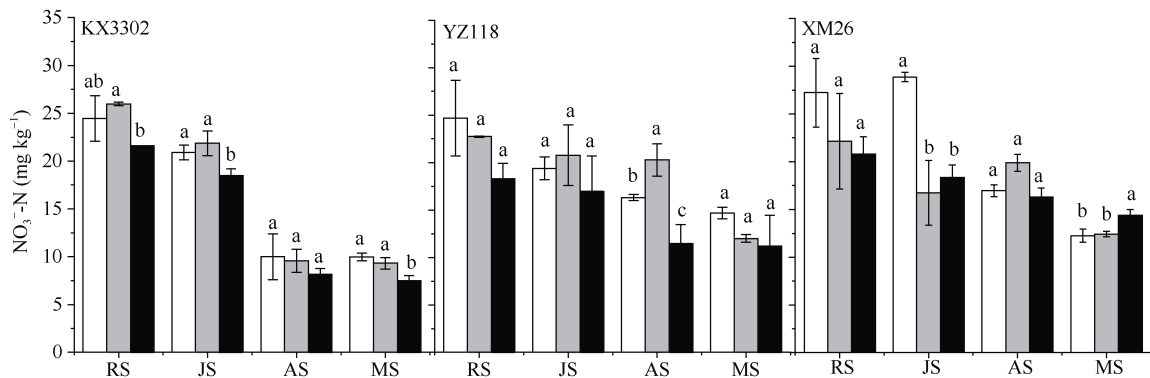


图 2 氮磷减施对不同小麦品种根际土壤硝态氮含量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on nitrate nitrogen content in rhizosphere soil

处理同表 1。KX3302: 科兴 3302; YZ118: 豫州 118; XM26: 新麦 26。RS: 返青期; JS: 拔节期; AS: 开花期; MS: 成熟期。同一生育时期不同柱上小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those in Table 1. KX3302: Kexing 3302; YZ118: Yuzhou 118; XM26: Xinmai 26. RS: regreening stage; JS: jointing stage; AS: anthesis stage; MS: maturation stage. Different lowercase letters above the bars within the same growth stage indicate significant differences at $P < 0.05$.

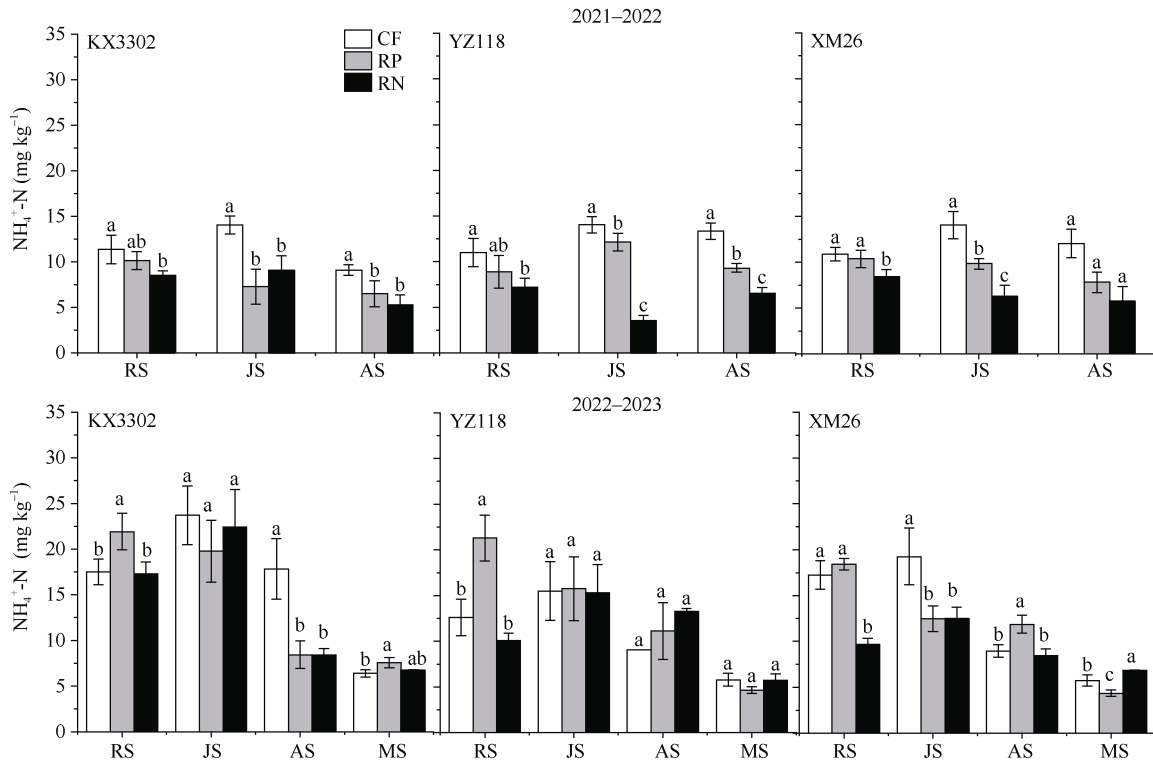


图 3 氮磷减施对不同小麦品种根际土壤铵态氮的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on ammonium nitrogen content in rhizosphere soil

处理同表 1。缩写同图 2。同一生育时期不同柱上小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those in Table 1. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters above the bars within the same growth stage indicate significant differences at $P < 0.05$.

2022—2023 年度, RN 处理下 KX3302、YZ118 和 XM26 的整个生育期土壤硝态氮含量较其相应 CF 处理分别平均下降 17.35%、22.91% 和 11.57%。RP 处理下 KX3302 的土壤硝态氮含量与 CF 无显著差异; XM26 只在拔节期较 CF 显著下降 41.97%, 而 YZ118 则在开花期较 CF 显著上升 24.30%。总体而言, RP

对土壤硝态氮含量的影响较小, 而 RN 处理下土壤硝态氮含量多呈显著下降趋势。

2.4.2 对铵态氮含量的影响 2021—2022 年度, RN 和 RP 处理与常规 CF 相比, 各品种根际土壤铵态氮含量多呈显著下降趋势(图 3)。RP 处理下 KX3302、YZ118 和 XM26 的整个生育期与相应 CF

相比分别平均下降 29.19%、20.99%和 23.36%; 而 RN 处理分别平均下降 33.95%、54.35%和 43.39%。2022—2023 年度, 不同处理下根际铵态氮含量的变化因品种和生育时期略有差异。RP 处理下, KX3302 在开花期、XM26 在拔节和成熟期的铵态氮含量均显著低于相应 CF 处理, 分别下降 52.69%、35.20%和 24.04%; 而 YZ118 则表现为 RP 处理与 CF 之间多无显著差异(返青期除外)。RN 处理下, KX3302 在开花期、XM26 在返青和拔节期的铵态氮含量均显著低于相应 CF 处理, 分别下降 52.72%、44.08%和 34.96%; 而 YZ118 则多表现无显著差异。

2.5 氮磷减施对不同强筋小麦品种根际土壤酶活性的影响

2.5.1 对脲酶活性的影响 由图 4 可知, 根际土壤脲酶活性随生育进程总体表现先升后降趋势, 在拔节期达到较高值。RP 处理下的根际土壤脲酶活性与 CF 相比, 多数未达统计上显著水平; 而 RN 处理下根际脲酶活性较 CF 多呈显著下降趋势, 但不同品种和不同年份之间略有差异。2021—2022 年度,

RP 处理下 XM26 根际土壤脲酶活性在返青、拔节、开花期较对照分别下降 19.77%、17.99%和 9.09%; 而 KX3302 和 YZ118 在成熟期较其相应对照分别增加 25.18%和 22.41%。RN 处理下, KX3302 和 XM26 根际土壤脲酶活性较 CF 多呈显著下降趋势, 分别平均下降 13.62%和 14.51%; 而 YZ118 仅在拔节期较 CF 显著下降 11.11%。2022—2023 年度, KX3302 在 RP 处理下的根际脲酶活性与 CF 之间均没有显著差异; YZ118 中 RP 与 CF 之间则在成熟期显著下降 (13.01%), 而 XM26 中 RP 在返青—开花期较 CF 平均下降 5.07%。RN 处理下 KX3302、YZ118 和 XM26 根际脲酶活性较其相应对照平均下降 3.00%、9.33%和 7.81%。

2.5.2 对蔗糖酶活性的影响 由图 5 可知, RP、RN 处理下根际土壤蔗糖酶活性较 CF 处理总体呈下降趋势。在 2021—2022 年度, RP 处理下的 KX3302、YZ118 和 XM26 开花期根际土壤蔗糖酶活性显著低于其相应 CF, 分别下降 18.15%、10.02%和 12.66%; 而 YZ118 和 XM26 在拔节期的酶活性则较 CF 分别

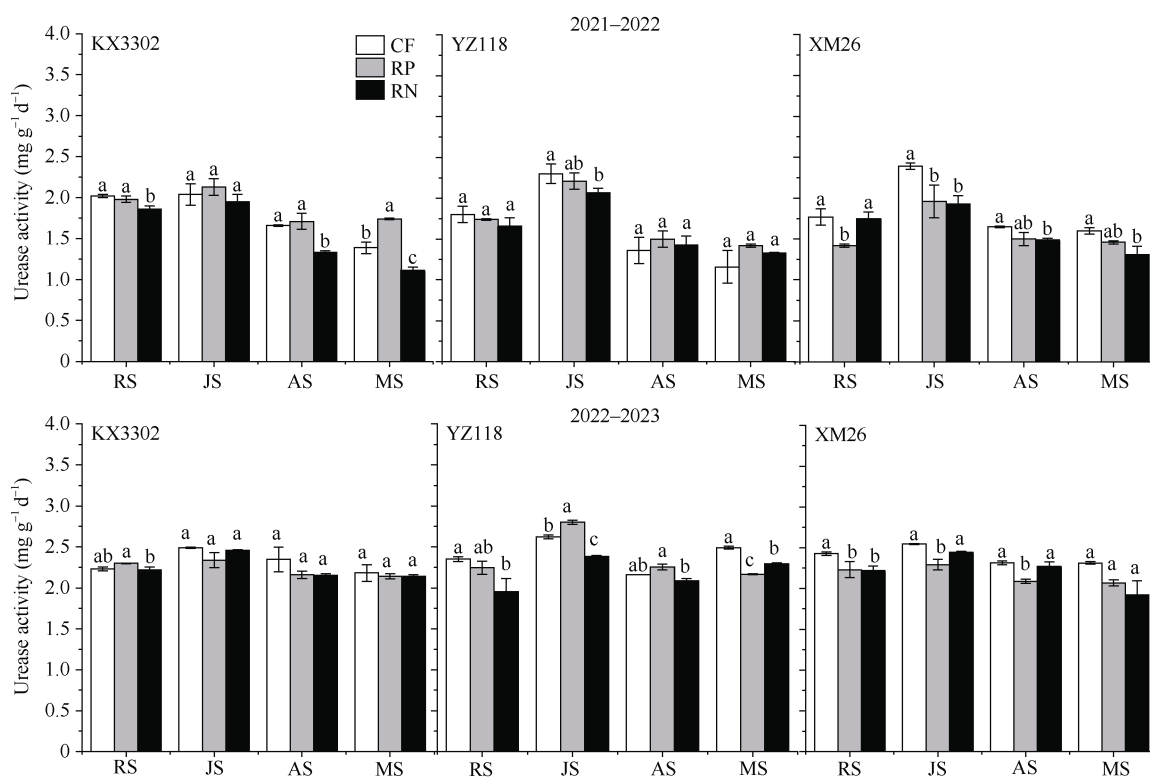


图4 氮磷减施对不同小麦品种土壤脲酶活性的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on urease activity in rhizosphere soil

处理同表1。缩写同图2。同一生育时期不同柱上小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those in Table 1. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters above the bars within the same growth stage indicate significant differences at $P < 0.05$.

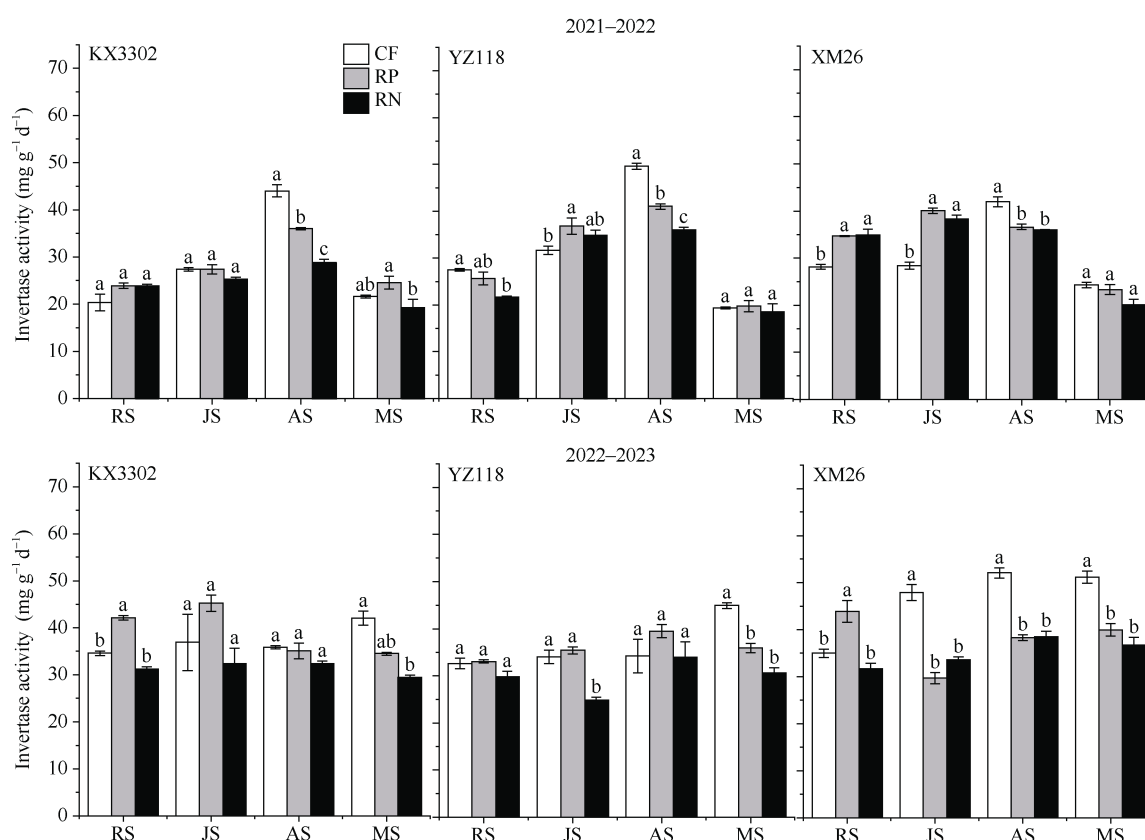


图 5 氮磷减施对不同小麦品种根际土壤蔗糖酶活性的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on invertase activity in rhizosphere soil

处理同表 1。缩写同图 2。同一生育时期不同柱上小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those in Table 1. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters above the bars within the same growth stage indicate significant differences at $P < 0.05$.

增加 16.32%、40.90%。RN 处理下, KX3302、YZ118 和 XM26 在开花期和成熟期分别较其 CF 处理平均下降 22.6%、15.47%和 15.65%。2022—2023 年度, RP 处理下的 YZ118 成熟期根际土壤蔗糖酶活性较其 CF 显著下降 20.11%, 而 XM26 在拔节、开花、成熟期分别较相应 CF 显著下降 37.92%、26.85%和 21.87%。RN 处理下不同小麦品种蔗糖酶活性较相应 CF 处理均下降, 以 KX3302 下降幅度较小, 各生育时期平均下降 15.43%。就 2 年总体趋势而言, RP 处理对根际土壤蔗糖活性影响较小, 而 RN 处理的影响较大, 且以 YZ118 中 RN 处理较对照下降幅度最大, 平均为 13.79%。

2.5.3 对磷酸酶活性的影响 由图 6 可知, 2021—2022 年度, RP 处理下 KX3302、YZ118 和 XM26 根际土壤磷酸酶活性分别较相应 CF 平均下降 13.88%、21.67%和 10.42%; 同时 RN 处理下 KX3302 和 YZ118 的酶活性较 CF 处理分别平均下降 8.94% 和 26.48%, 而 XM26 则与 CF 之间没有显著差异。

2022—2023 年度, RP 处理下 KX3302、YZ118 和 XM26 的根际磷酸酶活性从返青期到开花期较相应 CF 处理分别平均下降 9.11%、19.68%和 11.40%; 在成熟期, YZ118 下降 11.25%, 而 KX3302 和 XM26 与 CF 之间没有显著差异。RN 处理下, YZ118 的根际磷酸酶活性较其 CF 处理多呈显著下降趋势, 而 KX3302 和 XM26 则与 CF 处理之间多无显著差异。

2.6 氮磷减施对不同强筋小麦品种加工品质的影响

氮、磷减施对不同小麦品种籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值有显著影响(表 5)。2021—2022 年度 RP 处理下 KX3302 的蛋白质含量在 14%以上(符合强筋小麦标准), YZ118 和 XM26 的分别为 13.60%和 13.87% (符合中强筋小麦标准); RN 处理下, KX3302、YZ118 和 XM26 蛋白质含量较其相应对照分别显著下降 1.48、0.73 和 1.68 个百分点。RP 处理下, KX3302 和 YZ118 的湿面筋含量均在 30%以上, 符合强筋小麦标准(GB/T 17320-2013), XM26 符

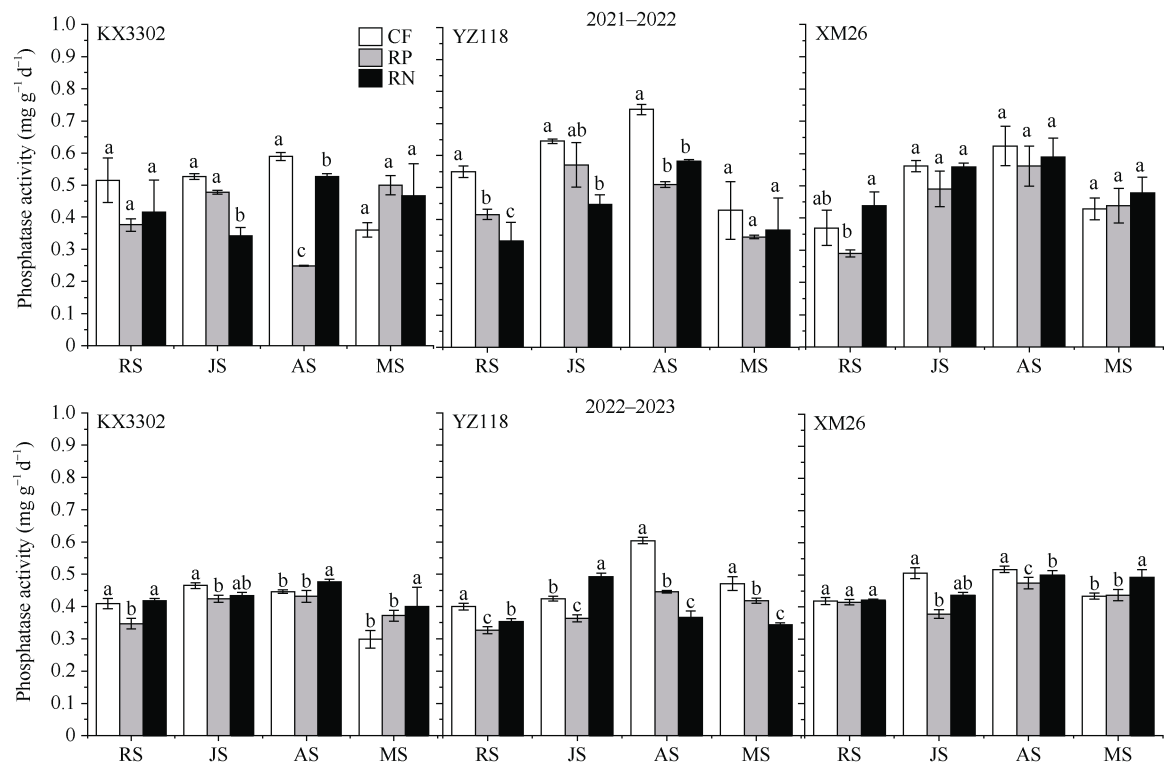


图 6 氮磷减施对不同小麦品种根际土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on phosphatase activity in rhizosphere soil

处理同表 1。缩写同图 2。同一生育时期不同柱上小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those in Table 1. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters above the bars within the same growth stage indicate significant differences at $P < 0.05$.

表 5 氮磷减施对不同小麦品种籽粒品质指标的影响

Table 5 Effects of nitrogen and phosphorus reduction on grain quality indexes of different wheat varieties

品种 Variety	处理 Treatment	2021–2022			2022–2023		2023–2024		
		蛋白质含量 Protein content (%)	湿面筋 含量 Wet gluten content (%)	沉降值 Sedimentation value (mL)	蛋白质 含量 Protein content (%)	沉降值 Sedimentation value (mL)	蛋白质 含量 Protein content (%)	湿面筋 含量 Wet gluten content (%)	沉降值 Sedimentation value (mL)
科兴 3302 KX3302	常规施肥 CF	14.39 a	30.70 a	45.56 a	14.13 a	48.62 a	16.24 a	33.55 a	55.25 a
	减磷处理 RP	14.42 a	30.94 a	45.22 a	14.05 a	45.05 a	15.96 b	32.38 b	52.38 a
	减氮处理 RN	12.91 b	27.11 b	41.14 b	14.04 a	40.63 a	15.54 c	32.93 b	51.87 a
豫州 118 YZ118	常规施肥 CF	13.46 a	31.27 b	35.02 a	14.83 a	35.70 a	—	—	—
	减磷处理 RP	13.60 a	34.83 a	29.84 b	13.35 a	30.60 a	—	—	—
	减氮处理 RN	12.73 b	31.46 b	29.24 b	14.05 a	31.80 a	—	—	—
新麦 26 XM26	常规施肥 CF	14.33 a	29.57 a	44.88 a	16.01 a	45.58 a	15.14 a	32.13 a	52.25 a
	减磷处理 RP	13.87 a	28.38 a	44.54 a	16.56 a	44.03 ab	15.77 a	33.30 a	50.25 a
	减氮处理 RN	12.65 b	25.53 b	41.48 b	15.12 a	41.14 b	14.70 a	30.80 b	49.62 a

处理同表 1。缩写同图 2。同一品种数据后不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those in Table 1. Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters within the same cultivar indicate significant differences at $P < 0.05$.

合中强筋小麦标准(湿面筋含量 $\geq 28\%$); 而 RN 处理下, KX3302 和 XM26 的湿面筋含量较相应 CF 处理分别下降 3.59 和 4.04 个百分点, YZ118 的无显著差异。KX3302 和 XM26 在氮、磷减施处理下沉降值均在 40 mL 以上, 符合强筋小麦标准(GB/T 17320-2013); 而 YZ118 在氮、磷减施下较对照分别下降 16.50% 和 14.79%。

2022—2023 年度, 不同处理之间的蛋白质含量

没有显著差异,这可能一方面与生态环境有关,另一方面也与氮、磷肥减施量有关。同时 RP、RN 处理下的沉降值较 CF 均呈下降趋势,但只有 XM26 在 RN 处理与 CF 之间的差异达显著水平。

2023—2024 年度,RP 处理对蛋白质、湿面筋和沉降值的影响较小,而 RN 处理的影响较大;但其蛋白质含量均大于 14.00%,湿面筋含量大于 30.00%。其中 RN 处理下蛋白质含量较 CF 处理平均下降 0.57 个百分点,而沉降值平均下降 3.00 mL。综合 3 年试验结果表明,RP 处理对加工品质的影响小于 RN 处理,其中 RN 处理下蛋白含量较 CF 处理平均下降 0.85 个百分点,而沉降值平均下降 4.49 mL。

2.7 小麦根际土壤化学性质和酶活性与产量的相关性分析

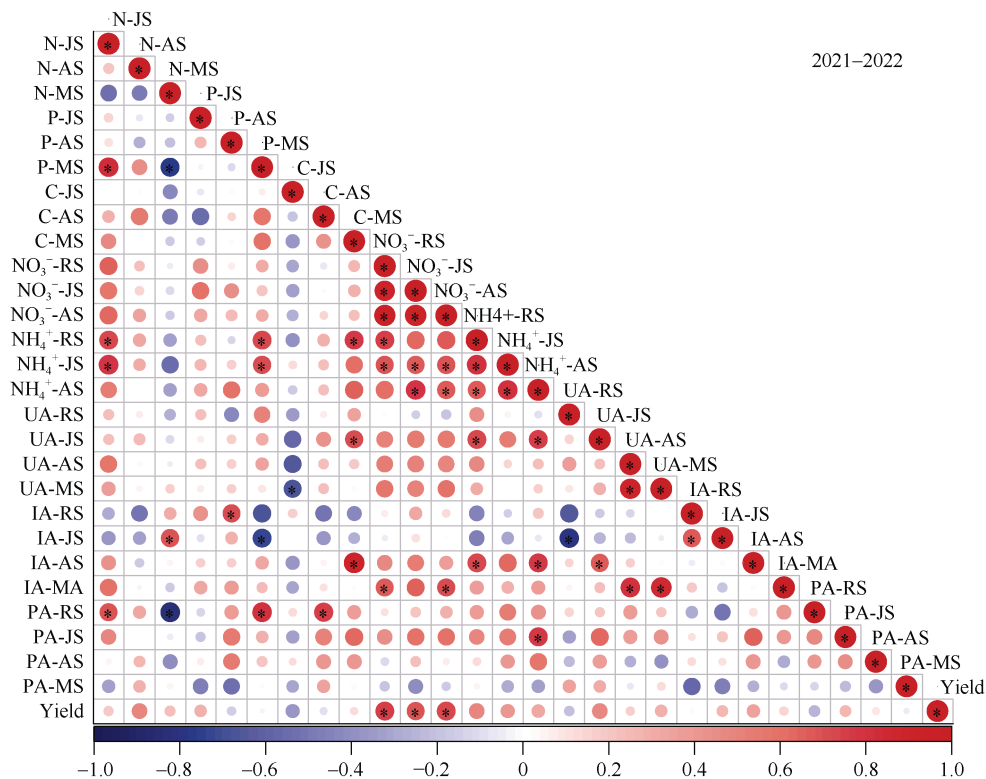
2021—2022 年度,拔节期全氮含量与土壤硝态氮含量、铵态氮含量和土壤磷酸酶活性多呈正相关(图 7),其中与返青期和拔节期的铵态氮含量、返青期的磷酸酶活性呈显著正相关;不同生育时期的土壤硝态氮含量和铵态氮含量之间多呈显著正相关;土壤脲酶活性、磷酸酶活性与土壤硝态氮含量、铵态氮含量之间多呈正相关;多个土壤化学性质指标和酶活性与产量之间呈正相关,其中返青期、拔节

期和开花期的硝态氮含量与产量之间的相关性达显著水平。由图 7 可知,土壤化学性质和土壤酶活性之间及其与产量之间的相关性在年际间存在一定差异,但总体而言其与产量之间多呈正相关;2022—2023 年度返青期、拔节期的土壤硝态氮含量、拔节期的蔗糖酶活性与产量之间呈显著正相关。

3 讨论

3.1 氮磷减施下小麦根际土壤化学性质及酶活性变化

土壤肥力水平高低是影响作物产量的关键因素之一,土壤全氮含量、微生物生物量氮含量与碱解氮含量是影响小麦、玉米产量的重要因子^[19-20]。长期施用化肥较不施肥处理可以显著提高土壤全氮含量^[20]。减施氮肥处理降低了 10~20 cm 土层中全氮、硝态氮、铵态氮和微生物生物量氮含量^[21]。有研究认为,施氮量对 0~20 cm 土层土壤氮含量、氮储量和土壤碳氮之间平衡无显著影响^[22]。这种差异可能与施肥方式(基施 68% vs 100%)、所用品种(强筋 vs 中筋)以及测定土层(10~20 cm vs 0~20 cm)有关。本研究结果表明,在第 1 年度,3 个强筋小麦品种土壤全氮、全磷、有机质含量在不同处理之间无明显差



(图 7)

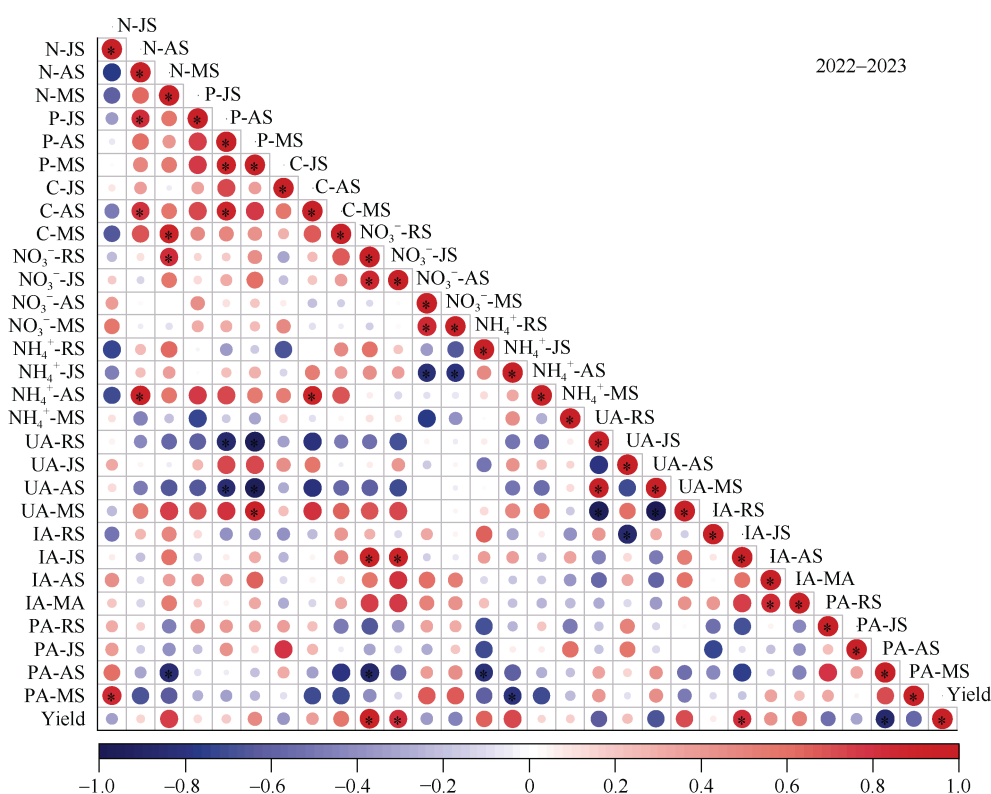


图7 小麦土壤化学性质和酶活性与产量的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of soil chemical properties and enzyme activities and wheat grain yield

N-JS、N-AS 和 N-MS 代表拔节、开花和成熟期土壤全氮含量; P-JS、P-AS 和 P-MS 代表拔节、开花和成熟期土壤全磷含量; C-JS、C-AS 和 C-MS 代表拔节、开花和成熟期土壤有机质含量; NO_3^- -RS、 NO_3^- -JS、 NO_3^- -AS 和 NO_3^- -MS 代表返青、拔节、开花和成熟期土壤硝态氮含量; NH_4^+ -RS、 NH_4^+ -JS、 NH_4^+ -AS 和 NH_4^+ -MS 代表返青、拔节、开花和成熟期土壤铵态氮含量; UA-RS、UA-JS、UA-AS 和 UA-MS 代表返青、拔节、开花和成熟期土壤脲酶活性; IA-RS、IA-JS、IA-AS 和 IA-MS 代表返青、拔节、开花和成熟期土壤蔗糖酶活性; PA-RS、PA-JS、PA-AS 和 PA-MS 代表返青、拔节、开花和成熟期土壤磷酸酶活性; Yield 代表籽粒产量。*表示在 0.05 水平相关性显著。

N-JS, N-AS, and N-MS represent soil total nitrogen content at the jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; P-JS, P-AS, and P-MS represent soil total phosphorus content at the jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; C-JS, C-AS, and C-MS represent soil organic matter content at the jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; NO_3^- -RS, NO_3^- -JS, NO_3^- -AS, and NO_3^- -MS represent soil nitrate nitrogen content at the regreening, jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; NH_4^+ -RS, NH_4^+ -JS, NH_4^+ -AS, and NH_4^+ -MS represent soil ammonium nitrogen content at the regreening, jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; UA-RS, UA-JS, UA-AS, and UA-MS represent soil urease activity at the regreening, jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; IA-RS, IA-JS, IA-AS, and IA-MS represent soil invertase activity at the regreening, jointing, anthesis, and maturity stages, respectively; PA-RS, PA-JS, PA-AS, and PA-MS represent soil phosphatase activity at the regreening, jointing, anthesis, and maturity stages, respectively. Yield represents grain yield.

* indicates significant correlation at $P < 0.05$.

异; 而第 2 年度减磷处理仅对成熟期土壤全磷含量造成显著下降, 而减氮处理下则显著降低成熟期全氮和全磷含量。这种差异一方面可能是根际土壤养分状况与植株生育时期有关, 另一方面与土壤有效磷和微生物群落有关^[23]。同时, 本研究发现第 2 年度不同处理对全氮(成熟期)、全磷(开花和成熟期)及有机质含量(开花和成熟期)的影响均达显著水平, 这种年际差异一方面可能与定位试验有关, 另一方面与第 2 年度 4 至 5 月份较多的降雨有关。同时氮、磷对土壤氮相关养分的影响也不同^[24]。本研究中, 常规施肥处理的硝态氮和铵态氮含量较高, 而减磷

处理的硝态氮和铵态氮与常规施肥之间差异不显著, 但减氮处理显著降低硝态氮和铵态氮含量。这表明在本试验条件下, 减氮的影响大于减磷, 可能土壤中植株生长的限制养分主要为氮而不是磷。除土壤养分外, 酶活性作为微生物功能的表征指标, 同样受施肥调控。姜彧宸等^[25]研究认为, 在不同种植模式下施磷均可以提高土壤酶活性, 在小麦单作和麦豆间作条件下均在磷 90 kg hm^{-2} 处理下土壤磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性最高, 但与磷 135 kg hm^{-2} 处理间没有显著差异。本研究结果表明, 与常规施肥相比, 减磷处理对不同品种根际土壤蔗糖酶、脲酶活性并

无显著影响,但显著降低了磷酸酶活性;同时减氮处理显著降低了不同小麦品种根际土壤磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性,说明本研究条件下氮肥用量对土壤酶活性影响较大。同时也表明不同类型酶活性对肥料的响应不同,研究表明增加磷肥可以显著提高 0~10 cm 土层碱性磷酸酶活性,而对过氧化物酶活性无显著影响^[26]。对根际土壤化学性质和酶活性与产量的相关分析表明,不同时期多个指标与产量呈正相关,一方面表明土壤供肥能力,包括酶活性高低、硝态氮和铵态氮含量等对产量形成起重要作用;另一方面也说明不同时期土壤化学性质和酶活性与产量的关系可能与环境条件以及植株生长发育等有关。

3.2 氮磷减施对不同强筋小麦品种产量及其构成因素的影响

由于过量施氮地块有较高的肥料氮残留,当季少施氮甚至不施氮处理也不会减产,这种效益可能会维持 1~3 季甚至 1~3 年^[27]。张铭等^[28]认为,在施氮 405 kg hm⁻²的基础上减氮 33.30%,高肥力和中肥力地块增产,而低肥力地块产量无显著差异。孙梦等^[29]研究表明,在施氮 300 kg hm⁻²基础上减氮 40%,高肥力地块和低肥力地块增产 6.01%~16.72%。本研究表明,在第 1 年度不施氮的条件下,3 个小麦品种的籽粒产量与常规施氮(240 kg hm⁻²)下产量的差异未达统计上的显著水平,但其产量下降 5.18%~12.77%;2022—2023 年度减氮 30%条件下科兴 3302 产量与常规施肥处理间无显著差异,而豫州 118 和新麦 26 则显著低于常规施肥;而 2023—2024 年度,减氮 30%下籽粒产量显著低于常规施肥(下降 15.72%~25.16%)。关于减氮对产量影响的不同结果,一方面与土壤的基础肥力和所用品种有关,另一方面与试验所用施氮水平有关。张军等^[30]研究表明,在施氮 172 kg hm⁻²和 192 kg hm⁻²基础上减氮 20%产量略有下降(无显著差异),从产量层面来说,减氮 20%仍可维持旱地小麦稳产。闫蓉等^[14]研究表明,施磷量(P₂O₅)由 120 kg hm⁻²减少至 70 kg hm⁻²仍能能够保证土壤磷素供应和小麦生长,实现稳产。本研究在 2021—2022 年度不施磷肥下 3 个品种产量与其常规施肥之间均没有显著差异,但豫州 118 和新麦 26 分别增产 0.78%和 21.40%;2022—2023 年度,减磷 30%则这 2 个品种分别下降 5.05%和 12.51%(没有显著统计差异);科兴 3302 在前 2 年度与对照之间产量基本相当,而在 2023—2024 年度下降 3.04%。

不同品种对氮磷减施的响应差异可能与品种特性有关,比如根系发达程度、根系分泌物等,这有待进一步的研究。穗数、穗粒数和千粒重是产量构成三要素,它们在籽粒产量形成过程中相互作用并受施肥水平的影响。研究表明,减施氮肥会降低小麦穗数、穗粒数^[30-31]。本研究结果表明,3 年的连续减氮处理下穗数较常规施肥均呈下降趋势,但穗粒数和千粒重在第 1 年度呈增加趋势,第 2、3 年度呈下降趋势,年际间穗粒数和千粒重的不同,可能一方面与土壤中有效氮有关,另一方面与气候条件有关,而产量三要素之间的相互协调也是一个潜在的因素,具体机制有待进一步通过多个生态环境来研究;但研究结果表明减施氮肥首先影响了小麦成穗数,2021—2022 年度,穗粒数和千粒重的增加不足以完全弥补穗数下降对产量的影响。减磷处理下穗数下降幅度低于减氮处理,而在 2021—2022 年度穗粒数增加幅度高于减氮处理,因此适当地弥补了穗数下降对产量的影响。从本研究结果来看,在黄淮麦区相似肥力水平下地块,减氮的效应远大于减施磷肥,这可能与土壤磷供应能力有关。陈露等^[32]认为,在土壤有效磷含量较低的湖北麦区,连续减施磷肥易减产;而在土壤有效磷含量较高的浙江麦区,施用 80%常规施磷量即可保证小麦产量和土壤质量不降低。在本研究条件下,减施氮肥(第 1 年度不施氮、第 2 年度减施 30%),或减施磷肥(第 1 年度不施磷、第 2~3 年度减磷 30%)可以在稳定小麦产量的基础上分别提高氮肥(平均提高 26.24%)、磷肥偏生产力(平均提高 34.45%)。

3.3 氮磷减施对不同强筋小麦品种品质的影响

氮、磷肥的施用对强筋小麦品质形成起着重要作用。随着高产广适型强筋小麦品种的培育和土壤肥力水平的提高,近年来,一些研究开始探讨适量减施氮、磷肥对小麦品质的影响。牛轶男等^[13]研究表明,在施氮量 225 kg hm⁻²的基础上减氮 20%,对籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值无显著影响,但继续减少施氮量则下降。张琨等^[12]研究表明,蛋白质含量和湿面筋含量随着施氮量减少而减少,且差异显著,但沉降值在施氮量减施 30%内不同处理间并无显著差异。柳伟伟等^[33]研究表明,增施磷肥可显著提高蛋白质含量,但在不同的基础地力下差异较大,且过量增施会降低湿面筋含量和沉降值。本研究结果表明,在 2021—2022 年度不施氮肥的条件下,3 个强筋小麦品种籽粒蛋白质含

量显著低于常规施肥, 且籽粒蛋白含量 $< 13.0\%$; 而不施磷肥下强筋小麦品种籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值与常规施肥之间没有显著差异, 这表明一方面可能氮肥对强筋品质的影响效应大于磷肥的效应, 另一方面也说明在当前的土壤肥力水平下减施磷肥对品质几乎没有显著影响。2022—2024 年度减施氮处理下籽粒蛋白含量与常规施肥之间没有显著差异, 这可能是这 2 个年度氮肥较常规施肥减施 30% (第 1 年度完全不施氮肥); 另外, 年际间的环境条件也会造成一定的影响; 蛋白质含量不仅与施氮水平有关, 不同肥力水平下蛋白质含量对土壤水分的响应也不同^[34]。2022—2024 年度, 减施磷肥下籽粒蛋白质含量、湿面筋含量和沉降值与常规施肥处理几乎相当, 这也表明在目前土壤肥力水平下, 施磷量为 94.5 kg hm^{-2} 并不会对优质强筋小麦品种 (科兴 3302 和新麦 26) 的品质造成明显影响。有研究表明, 在速效磷含量 15.94 kg hm^{-2} 的基础地力下, 施磷 75 kg hm^{-2} 下蛋白质含量、面团稳定时间和评价价值均高于施磷 105 kg hm^{-2} , 说明 75 kg hm^{-2} 施磷量下可以保证小麦加工品质^[35]。尽管氮、磷肥对产量品质的调控作用受土壤供肥能力的影响, 本研究在同一地块下的结果具有一定的局限性。但对于本研究土壤肥力水平和强筋小麦品种而言, 从产量和品质综合而言, 单独减施氮 30% 一至两年, 减磷 30% 二至三年可以维持小麦产量、品质的条件下提高肥料利用效率。

4 结论

在本试验条件下, 连续 2~3 年减施磷肥 30% 并不会造成产量和品质的显著下降; 连续 1~2 年减施氮肥对产量没有显著影响, 而连续减施 3 年则产量显著下降; 蛋白质含量则在第 1 年度不施氮肥的情况下较常规施肥显著下降, 而在第 2~3 年度蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值与常规施肥多无显著差异。产量构成结果表明, 减施氮、磷肥主要通过穗数的降低影响产量, 其中减氮对产量的影响效应大于减施磷肥。减氮主要造成根际土壤硝态氮含量、铵态氮含量以及土壤酶活性、微生物量碳含量、氮含量的下降, 而减施磷肥的效应小于减施氮肥, 但减施磷肥对根际土壤磷酸酶活性的影响大于减施氮肥。在本试验生态环境和土壤肥力条件下, 适量减氮 (第 1 年度不施氮、第 2 年度减施 30%) 可以在稳定产量、品质的基础上, 氮肥偏生产力平均提高

26.24%; 而适量减磷 (第 1 年度不施磷, 第 2~3 年度减磷 30%), 在保障产量、品质的前提下, 相应磷肥偏生产力平均提高 34.45%。

References

- [1] 董志强, 吕丽华, 姚艳荣, 等. 水氮互作下强筋小麦师栾 02-1 产量和品质. 作物学报, 2023, 49: 1942–1953.
Dong Z Q, Lyu L H, Yao Y R, et al. Yield and quality of strong gluten wheat Shiluan 02-1 under water and nitrogen interaction. Acta Agron Sin, 2023, 49: 1942–1953 (in Chinese with English abstract).
- [2] Ma D Y, Zhang J, Hou J F, et al. Evaluation of yield, processing quality, and nutritional quality in different-colored wheat grains under nitrogen and phosphorus fertilizer application. Crop Sci, 2018, 58: 402–415.
- [3] 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. 中国农业科学, 2019, 52: 73–85.
Ma Q X, Wang Z 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. Sci Agric Sin, 2019, 52: 73–85 (in Chinese with English abstract).
- [4] 马瑞琦, 常旭虹, 刘阿康, 等. 减量施氮协同提升强筋小麦产量和品质. 植物营养与肥料学报, 2023, 29: 172–187.
Ma R Q, Chang X H, Liu A K, et al. Coordinated improvement of yield and quality of strong gluten wheat by reducing exogenous nitrogen application. J Plant Nutr Fert, 2023, 29: 172–187 (in Chinese with English abstract).
- [5] 于天一, 李晓亮, 路亚, 等. 磷对花生氮素吸收和利用的影响. 作物学报, 2019, 45: 912–921.
Yu T Y, Li X L, Lu Y, et al. Effect of phosphorus (P) on nitrogen (N) uptake and utilization in peanut. Acta Agron Sin, 2019, 45: 912–921 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究. 植物营养与肥料学报, 2023, 29: 201–221.
Ding W C, He P, Zhou W. Development strategies of the new-type fertilizer industry in China. J Plant Nutr Fert, 2023, 29: 201–221 (in Chinese with English abstract).
- [7] He R, Shao C F, Shi R G, et al. Development trend and driving factors of agricultural chemical fertilizer efficiency in China. Sustainability, 2020, 12: 4607.
- [8] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214–221.
Liu Q P. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China. Trans CSAE, 2017, 33(6): 214–221 (in Chinese with English abstract).
- [9] 喻丹, 董晓华, 高松, 等. 基于改进的最小累积阻力模型评价淮河流域氮肥面源污染风险. 农业工程学报, 2024, 40(24): 226–235.
Yu D, Dong X H, Gao S, et al. Evaluation of nitrogen non-point source pollution risk in the Huaihe River Basin based on an improved minimum cumulative resistance model. Trans CSAE, 2024, 40(24): 226–235 (in Chinese with English abstract).
- [10] 马红梅, 曹寒冰, 谢英荷, 等. 晋南黄土旱塬小麦养分投入与化肥减施经济环境效应评价. 中国农业科学, 2021, 54: 2804–2817.

- Ma H M, Cao H B, Xie Y H, et al. Evaluation on fertilizer application and its economic-environmental benefits associated with fertilizer reduction potential for dryland wheat in Loess Plateau of Southern Shanxi province. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 2804–2817 (in Chinese with English abstract).
- [11] 马永鑫, 谭军利, 韦广源, 等. 减氮节水对引黄灌区春小麦耗水特征及水分利用效率的影响. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(6): 150–160.
- Ma Y X, Tan J L, Wei G Y, et al. Effects of nitrogen reduction and water saving on water consumption characteristics and water use efficiency of spring wheat in Ningxia Yellow River irrigation area. *Agric Res Arid Areas*, 2024, 42(6): 150–160 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张琨, 秦毛毛, 刘艳喜, 等. 减量施氮对郑麦 101 产量及加工品质的影响. *河南农业科学*, 2018, 47(5): 24–27.
- Zhang K, Qin M M, Liu Y X, et al. Effects of reducing nitrogen application rate on grain yield and processing quality of Zhengmai 101. *J Henan Agric Sci*, 2018, 47(5): 24–27 (in Chinese with English abstract).
- [13] 牛铁男, 申丹丹, 丁永刚, 等. 减氮模式对稻茬中筋小麦籽粒产量、品质和氮肥效率的影响. *麦类作物学报*, 2021, 41: 1524–1533.
- Niu Y N, Shen D D, Ding Y G, et al. Effect of nitrogen reduction models on grain yield, quality and nitrogen efficiency of medium-gluten wheat following rice. *J Triticeae Crops*, 2021, 41: 1524–1533 (in Chinese with English abstract).
- [14] 闫蓉, 朱利, 冉瑾怡, 等. 渭北旱地磷肥减施措施对冬小麦产量及磷吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29: 1265–1279.
- Yan R, Zhu L, Ran J Y, et al. Effects of phosphorus reduction measures on winter wheat yield and phosphorus uptake and utilization in Weibei dryland. *J Plant Nutr Fert*, 2023, 29: 1265–1279 (in Chinese with English abstract).
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. pp 274–325.
- Guan S Y. Soil Enzyme and Its Research Method. Beijing: Agriculture Press, 1986. pp 274–325 (in Chinese).
- [16] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21: 318–325.
- Gao H J, Zhu P, Peng C, et al. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input. *J Plant Nutr Fert*, 2015, 21: 318–325 (in Chinese with English abstract).
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 79–87.
- Bao S D. Soil Agrochemical Analysis, 3rd edn. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 79–87 (in Chinese).
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Methods of Measuring Soil Microbial Biomass and Their Applications. Beijing: China Meteorological Press, 2006 (in Chinese).
- [19] Zhang X F, Zhu A N, Xin X L, et al. Tillage and residue management for long-term wheat-maize cropping in the North China Plain: I. Crop yield and integrated soil fertility index. *Field Crops Res*, 2018, 221: 157–165.
- [20] 丁世杰, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期施肥下土壤氮素指标与小麦/玉米产量关系研究. *核农学报*, 2025, 39: 157–169.
- Ding S J, Huang S M, Zhang S Q, et al. Study on the relationship between soil nitrogen indexes and wheat/maize yield under long-term fertilization. *J Nucl Agric Sci*, 2025, 39: 157–169 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈琛, 石柯, 朱长伟, 等. 种植密度和施氮量对豫北潮土区小麦光合特性和产量及土壤氮素的影响. *中国农业科技导报*, 2023, 25(5): 24–33.
- Chen C, Shi K, Zhu C W, et al. Effects of planting density and nitrogen application rate on wheat photosynthetic characteristics, yield, and soil nitrogen content in fluvo-aquic soil in Northern Henan province. *J Agric Sci Technol*, 2023, 25(5): 24–33 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王丽芳, 刘世洁, 康娟, 等. 施氮对小麦根-冠及土壤碳氮特征的影响. *麦类作物学报*, 2022, 42: 451–456.
- Wang L F, Liu S J, Kang J, et al. Influence of nitrogen application on the carbon and nitrogen characteristics of root-shoot and soil in wheat field. *J Triticeae Crops*, 2022, 42: 451–456 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘志平, 周怀平, 解文艳, 等. 长期氮磷配施对褐土细菌多样性及土壤酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(2): 163–171.
- Liu Z P, Zhou H P, Xie W Y, et al. Effect of long-term combined application of nitrogen and phosphorus on bacterial diversity and soil enzyme activities in cinnamon soil. *Agric Res Arid Areas*, 2022, 40(2): 163–171 (in Chinese with English abstract).
- [24] 盛基峰, 李垚, 于美佳, 等. 氮磷添加对高寒草地土壤养分和相关酶活性的影响. *生态环境学报*, 2022, 31: 2302–2309.
- Sheng J F, Li Y, Yu M J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus an addition on soil nutrients and activity of related enzymes in alpine grassland. *Ecol Environ Sci*, 2022, 31: 2302–2309 (in Chinese with English abstract).
- [25] 姜彧宸, 冯月, 池田, 等. 不同磷肥水平和种植模式对土壤养分含量和酶活性的影响. *山西农业科学*, 2023, 51: 742–749.
- Jiang Y C, Feng Y, Chi T, et al. Effects of different phosphate fertilizer levels and planting patterns on soil nutrient content and enzyme activity. *J Shanxi Agric Sci*, 2023, 51: 742–749 (in Chinese with English abstract).
- [26] 甘润, 齐鹏, 郭高文, 等. 磷添加对陇中黄土高原旱作农田土壤呼吸组分特征与碳平衡的影响. *农业环境科学学报*, 2023, 42: 599–611.
- Gan R, Qi P, Guo G W, et al. Effects of phosphorus addition on soil respiration component characteristics and carbon balance in dry farmlands of the Loess Plateau, Longzhong, China. *J Agro-Environ Sci*, 2023, 42: 599–611 (in Chinese with English abstract).
- [27] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标. *土壤学报*, 2021, 58: 1–13.
- Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization. *Acta Pedol Sin*, 2021, 58: 1–13 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张铭, 蒋达, 缪瑞林, 等. 不同土壤肥力条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收利用及产量的影响. *麦类作物学报*, 2010, 30:

- 135–140.
- Zhang M, Jiang D, Miao R L, et al. Effects of N application rate on nitrogen absorption, utilization and yield of wheat under different soil fertility after rice. *J Triticeae Crops*, 2010, 30: 135–140 (in Chinese with English abstract).
- [29] 孙梦, 冯昊翔, 张晓燕, 等. 不同土壤肥力下施氮量对小麦产量和品质的影响. *麦类作物学报*, 2022, 42: 826–834.
- Sun M, Feng H X, Zhang X Y, et al. Effects of nitrogen rates on wheat yield and quality under different soil fertility regimes. *J Triticeae Crops*, 2022, 42: 826–834 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张军, 胡川, 周起晖, 等. 减氮及有机肥替代对旱地冬小麦干物质积累、转运、分配和产量的影响. *作物学报*, 2025, 51: 207–220.
- Zhang J, Hu C, Zhou Q H, et al. Effects of nitrogen reduction and organic fertilizer substitution on dry matter accumulation, translocation, distribution, and yield of dryland winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 207–220 (in Chinese with English abstract).
- [31] 钱彩虹, 陈立, 李春燕, 等. 减量施氮对稻茬红皮强筋小麦产量、品质和氮盈亏的影响. *江苏农业科学*, 2023, 51(9): 75–81.
- Qian C H, Chen L, Li C Y, et al. Effects of reduced nitrogen application on yield, quality and apparent nitrogen budget of red-skinned strong-gluten wheat after rice. *Jiangsu Agric Sci*, 2023, 51(9): 75–81 (in Chinese with English abstract).
- [32] 陈露, 王秀斌, 朱瑞利, 等. 长江中下游小麦产量、土壤酶活性及微生物群落结构对磷肥减施的响应. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27: 392–402.
- Chen L, Wang X B, Zhu R L, et al. Response of wheat yield and soil microbial activity to phosphorus fertilizer reduction in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Plant Nutr Fert*, 2021, 27: 392–402 (in Chinese with English abstract).
- [33] 柳伟伟, 马宏亮, 樊高琼, 等. 生态条件和施磷量对四川不同筋力型小麦籽粒产量与蛋白质品质的影响. *麦类作物学报*, 2018, 38: 298–305.
- Liu W W, Ma H L, Fan G Q, et al. Effect of phosphorus application on grain yield and protein quality of different gluten type wheat in Sichuan Province. *J Triticeae Crops*, 2018, 38: 298–305 (in Chinese with English abstract).
- [34] 张玉峰, 杨武德, 白晶晶, 等. 冬小麦产量与籽粒蛋白质含量协同变化特点及水肥调控. *中国农业科学*, 2006, 39: 2449–2458.
- Zhang Y F, Yang W D, Bai J J, et al. Coordinated variation of yield and grain protein content in winter wheat and strategies of irrigation and fertilization. *Sci Agric Sin*, 2006, 39: 2449–2458 (in Chinese with English abstract).
- [35] 孙慧敏, 于振文, 颜红, 等. 不同土壤肥力条件下施磷量对小麦产量、品质和磷肥利用率的影响. *山东农业科学*, 2006, 38(3): 45–47.
- Sun H M, Yu Z W, Yan H, et al. Effect of phosphorus rate applied on yield, quality and phosphorus utilization ratio in winter wheat under different fertility soil. *Shandong Agric Sci*, 2006, 38(3): 45–47 (in Chinese with English abstract).