

不同施磷方式下磷肥减施对伊犁黑土区春小麦产量及磷肥利用率的影响

方一涵¹ 陈楠楠¹ 王畅² 王博媛¹ 张立存^{1,3,4} 梁飞^{1,3,4}

(¹伊犁师范大学资源与环境学院, 835000, 新疆伊宁; ²新疆百诺农业科技有限公司, 833200, 新疆奎屯;

³伊犁师范大学资源与生态研究所, 835000, 新疆伊宁; ⁴伊犁师范大学伊犁河谷农业资源与环境实验室, 835000, 新疆伊宁)

摘要 为探究不同施磷方式下磷肥减施对新疆伊犁黑土区春小麦产量形成及磷肥利用率的影响,以新疆生产建设兵团第四师的76团与77团为双试验区,采用双因素裂区设计,设置一次性施基肥(BF)和滴灌分次施肥(基肥70%、抽穗期后15%和扬花期后15%,TD)2种施磷方式,常规用量(202.5 kg/hm², P₁₀₀)、常规用量60%(121.5 kg/hm², P₆₀)、常规用量40%(81.0 kg/hm², P₄₀)、不施磷肥(P₀)和不施肥(CK)5个磷肥水平。结果表明, P₆₀处理可显著提高磷肥利用率及春小麦的株高、SPAD值、干物质积累量和产量; P₆₀较P₁₀₀处理的株高提高8.9%~30.4%, SPAD值提高0.7%~19.1%。TD处理显著提升黑土区磷素有效性,2个试验区TD-P₆₀较传统基肥处理(BF-P₆₀)分别增产4.9%(76团)和31.2%(77团),磷肥偏生产力(PFP)和农学效率(AE)最高分别达75.9 kg/kg和11.8 kg/kg。TD处理在底砾黑土区(77团)的增产增效响应更明显。综上,本研究条件下全程BF处理磷肥推荐用量为97.5~108.5 kg/hm²,TD处理推荐用量为54.5~60.0 kg/hm²;优先采用TD-P₆₀处理以协同提升春小麦产量与磷肥利用率,实现伊犁黑土区农业可持续发展。

关键词 磷肥减施; 磷肥施用; 滴灌水肥一体化; 伊犁黑土区; 春小麦

春小麦 (*Triticum aestivum* L.) 作为我国西北干旱和半干旱地区的主要粮食作物,在保障粮食安全中发挥不可替代的作用^[1]。磷是植物生长发育必需的三大营养元素之一,参与作物光合作用、能量代谢和碳氮同化过程^[2]。并对作物干物质积累、产量形成及抗逆性具有决定性作用^[3-4]。贾兵丽等^[5]研究表明,优化施磷可显著提高旱地小麦产量并改善水分利用效率。然而,磷在土壤中易被固定,导致其利用率普遍较低;过量施磷不仅会造成资源浪费,还会加剧土壤磷素盈余;优化施磷方式可提升磷肥利用率并减少土壤磷素盈余^[6]。因此,优化磷肥施用策略是实现农业绿色发展的关键。

滴灌技术由于其绿色、高效和节水的特点被大面积推广使用^[7-8]。滴灌结合水肥一体化创新模式的广泛应用在密植作物中取得显著成效,石雄高等^[9]研究表明,该技术显著提升了小麦产量和肥料利用率。新疆地区小麦氮、磷和钾肥的平均利用率分别为41.4%、21.8%和45.2%,平均产量为

7504 kg/hm²^[10],均显著高于全国平均水平;现有研究^[11]多集中于黄土高原或北疆地区,其中,马清霞等^[12]在黄土高原研究证明,过量施磷大幅增加了小麦生长后期的干物质损失;李刚等^[13]研究发现,西北地区的春小麦在低磷供应下对于旱胁迫适应性更强,但针对伊犁黑土区这一特殊生态区域的系统性研究仍较匮乏。

新疆伊犁地区作为我国重要的黑土资源分布区^[14],春小麦种植经历着由漫灌到滴灌的全面转型,传统基施高磷肥模式会造成作物磷素过剩和土壤环境污染等诸多问题,导致其难以适应水肥协同调控需求。因此,在保证春小麦稳产的情况下优化磷肥施用模式是旱区农业研究的重点。为探索适合伊犁黑土区的滴灌春小麦动态供磷策略,本研究以新疆生产建设兵团第四师76团和77团为试验基地,设置双因素裂区设计,系统研究不同施磷方式下减磷对春小麦生长指标、干物质积累、籽粒产量及磷肥利用率的影响,以期为该地区建立优化施磷模式、为实现区域农业可持续发展

作者简介: 方一涵,研究方向为农业资源与环境, E-mail: fangyihan26@126.com

张立存为通信作者,主要从事农业资源与环境研究, E-mail: zhanglicunshzu@163.com; 梁飞为共同通信作者,主要从事作物滴灌水肥一体化研究, E-mail: liangfei3326@126.com

基金项目: 伊犁哈萨克自治州重点研究与技术开发专项(YZD2024A02); 新疆维吾尔自治区“天池英才”青年博士人才项目(2025QNBS012); 新疆维吾尔自治区大学生创新创业训练计划项目(X202410764008)

收稿日期: 2025-07-02; 修回日期: 2025-08-07; 网络出版日期: 2026-02-26

展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年在新疆生产建设兵团第四师 76

团（80.86° N, 42.96° E, 海拔 1615.3 m）和 77 团（80.86° N, 42.99° E, 海拔 1646.6 m）进行，两地均位于天山山脉西麓，属温带大陆性气候，年均气温 2.9 °C，年均降水量 200~500 mm，试验区 0~20 cm 耕层土壤基本理化性状见表 1。

表 1 试验区土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the experimental areas

试验区 Experimental area	土壤类型 Soil type	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	电导率 Electrical conductivity (mS/cm)	pH	速效磷 Available phosphorus (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	碱解氮 Available hydrolyzable nitrogen (mg/kg)
76 团 76th regiment	黑钙土	1.4	158.6	8.4	17.2	217.7	98.9
77 团 77th regiment	底砾黑土	1.3	146.5	8.3	11.2	162.0	71.3

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区设计，主区为 2 个施磷方式（M），分别为一次性施基肥（BF）和滴灌分次施肥（TD），其中 BF 处理于播种前一次性施基磷肥，TD 处理按基肥 70%、抽穗期后 15%和扬花期后 15%的比例随滴灌分次施磷肥；副区为 5 个施磷水平（L），分别为常规用量（202.5 kg/hm², P₁₀₀）、常规用量 60%（121.5 kg/hm², P₆₀）、常规用量 40%（81.0 kg/hm², P₄₀）、不施磷肥（P₀）和不施肥（CK）处理。共计 10 个处理，随机排列，各处理重复 3 次；2 个试验地设计相同，每个试验小区面积为 200 m²（10 m×20 m）。供试磷肥为重过磷酸钙（基肥）和磷酸一铵（追肥）。

除 CK 处理外，各处理氮肥和钾肥统一施用（225 kg/hm² N 和 45 kg/hm² K₂O）。其中按照氮肥（30%:40%:30%）、钾肥（40%:30%:30%）的比例分次随水滴施。氮肥和钾肥分别为尿素和硫酸钾；供试春小麦品种为宁春 16。春小麦等行距（15 cm）种植，每条滴灌带滴灌 4 行小麦，播种时间为 2024 年 4 月 25 日，收获时间为 2024 年 8 月 23 日。其他管理方式同当地大田管理。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 株高与叶绿素相对含量（SPAD 值）于抽穗期和扬花期在各处理随机取 20 株代表整体长势的小麦，使用直尺测量株高，采用 SPAD-502 叶绿素仪（柯尼卡美能达，日本）测定春小麦主茎的旗叶 SPAD 值。

1.3.2 干物质积累量于拔节期、抽穗期、扬花期和成熟期在各处理按对角线取 4 个 1 m² 样方，收集地上部样品带回，105 °C 杀青 30 min，80 °C 烘干至恒重后称重。

1.3.3 产量及其构成因素于成熟期在各处理长势均匀的区域选取 1.2 m² 样方测定穗数和籽粒产量，每个重复选择 3 个样方对麦穗进行计数，脱粒后风干称重，测定籽粒含水量，各小区随机选取 20 株长势均匀的春小麦进行考种，记录穗粒数、穗长和千粒重。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 27.0 进行数据整理统计与方差分析，采用 Origin 2021 进行回归及相关分析、制图。相关指标计算公式：磷肥偏生产力（phosphate fertilizer productivity, PFP）=施磷区产量/磷肥施用量；磷肥农学效率（agronomic efficiency, AE, kg/kg）=（施磷区产量-无磷区产量）/磷肥施用量。

2 结果与分析

2.1 不同施磷方式下磷肥减施对滴灌春小麦生长的影响

双因素分析结果（表 2）表明，施磷方式、施磷水平及其交互作用对滴灌春小麦株高和 SPAD 值的影响因试验地与生育期而异。整体而言，三者均对春小麦的株高和 SPAD 值有显著影响。施磷水平对两地春小麦各生育期生长指标的影响均达极显著水平；而施磷方式对 76 团扬花期株高的影响较弱，但对 77 团各生育期指标均有极显著影响。

在 2 个试验地中，随着减磷比例的增大，春小麦的株高均呈先增加后降低的趋势，均在 P₆₀ 处理达到峰值（图 1a）。P₆₀ 处理的株高均显著高于 CK 和 P₀ 处理。与 CK 处理相比，抽穗期 76 团 TD-P₆₀ 和 BF-P₆₀ 处理株高增幅分别为 22.8%和 23.0%，77 团增幅分别为 8.9%和 30.4%；扬花期 76 团 TD-P₆₀

表 2 施磷方式和水平对春小麦株高和 SPAD 值影响的差异

Table 2 The difference in the effect of phosphorus application methods and levels on plant height and SPAD value of spring wheat

变异来源 Source of variance	76 团 76th regiment				77 团 77th regiment			
	抽穗期 Heading		扬花期 Flowering		抽穗期 Heading		扬花期 Flowering	
	株高 Plant height	SPAD	株高 Plant height	SPAD	株高 Plant height	SPAD	株高 Plant height	SPAD
施磷方式 M	81.86***	65.50***	4.40	6.42*	55.60***	72.58***	195.66***	74.17***
施磷水平 L	22.95***	21.40***	8.66***	17.19***	52.79***	46.32***	29.43***	44.00***
施磷方式×施磷水平 M×L	0.92***	9.41***	2.15*	3.06*	13.37***	14.17***	1.52***	9.22***

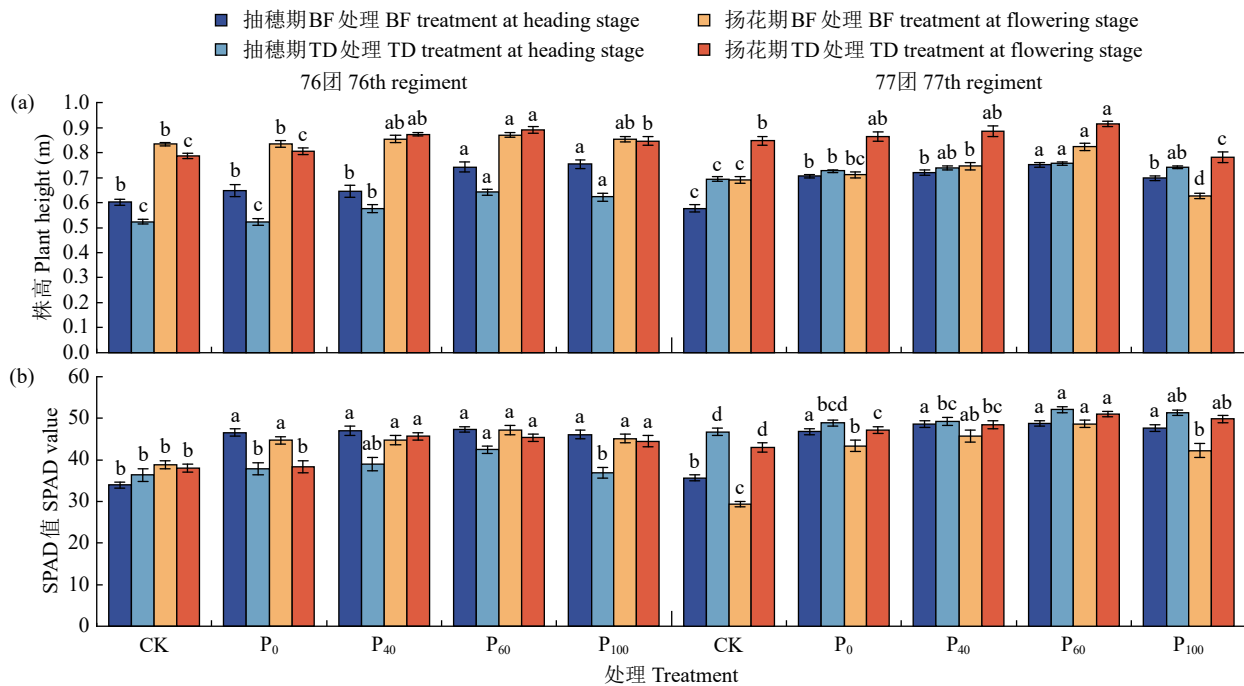
“*”、“**”和“***”分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平影响显著。下同。

“*”, “**” and “***” indicate significant influences at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$ levels, respectively. The same below.

和 BF-P₆₀ 处理的增幅分别为 13.1% 和 4.5%，77 团的增幅分别为 7.9% 和 19.2%。施磷方式对株高的影响因试验地和生育期而异，76 团抽穗期 BF 处理的株高高于 TD 处理，77 团抽穗期和扬花期 TD 处理均高于 BF 处理。

SPAD 值整体变化趋势与株高一致（图 1b），

77 团 TD 处理的效果更优。76 团抽穗期和扬花期 TD-P₆₀ 的 SPAD 值均显著高于 CK 和 P₀ 处理，与 CK 处理相比，抽穗期 TD-P₆₀ 处理增加了 16.8%，扬花期 TD-P₆₀ 处理增加了 19.1%；BF 处理各磷肥水平间差异不显著。77 团抽穗期和扬花期 TD-P₆₀ 处理的 SPAD 值均显著高于 CK、P₀ 和 P₄₀ 处理，抽



不同小写字母表示同一试验地、同一时期的不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level among treatments in the same experimental area and period. The same below.

图 1 施磷方式和水平对春小麦不同生育期株高与 SPAD 值的影响

Fig.1 Effects of phosphorus application methods and levels on plant height and SPAD value of spring wheat at different growth stages

穗期 BF 处理各磷肥水平间差异不显著。

综上所述，适量减磷并选择 TD 处理可以有效提高春小麦株高和 SPAD 值，促进春小麦生长。但不同试验地和生育期中，施磷方式和水平组合对春小麦生长的影响存在差异。

2.2 不同施磷方式下磷肥减施对滴灌春小麦干物质积累量的影响

双因素分析结果（表 3）表明，施磷方式、施

磷水平及其交互作用对 2 个试验地春小麦干物质积累量的调控存在显著差异。施磷水平对干物质积累量多数影响显著，但施磷方式对 76 团无显著影响，对 77 团影响较强。2 个试验地干物质积累量随生育进程呈阶梯式增长，成熟期达峰值（2 个试验地较拔节期分别增加 5.2 和 4.8 倍）；各生育期干物质积累量均随着施磷量的增加呈先增加后减少的趋势，除 76 团成熟期 TD 处理干物质积累量最大

表 3 施磷方式和水平对春小麦干物质积累量影响的差异

Table 3 The difference in the effect of phosphorus application methods and levels on dry matter accumulation of spring wheat

变异来源 Source of variance	76 团 76th regiment				77 团 77th regiment			
	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	扬花期 Flowering	成熟期 Maturity
施磷方式 M	0.36	0.82	1.27	0.35	0.36	15.08***	63.00***	25.32***
施磷水平 L	5.13**	4.93**	10.81***	15.11***	4.40*	1.48	2.95*	2.99*
施磷方式×施磷水平 M×L	0.51	0.82	2.11	2.87*	0.25	0.42	0.85	0.58

在 P₄₀ 处理外，峰值均出现在 P₆₀ 处理。

在拔节期，76 团 TD-P₆₀ 处理较 CK 处理显著增加了 250.9%；77 团 TD-P₆₀ 处理较 CK 和 P₀ 处理分别显著增加了 150.86%和 53.96%（图 2）。抽穗期，76 团 TD-P₆₀ 处理较 CK 和 P₀ 处理分别显著增加了 27.52%和 26.24%，BF-P₆₀ 较 CK 处理显著增加了 30.73%；扬花期，76 团 TD-P₆₀ 与 BF-P₆₀ 处理均显著高于对应的 CK 和 P₀ 处理，增加了 62.74%~

64.34%；77 团 TD-P₆₀ 处理显著高于 CK 和 P₀ 处理，分别增加了 18.73%和 18.64%，在成熟期，77 团 TD 处理显著高于 BF 处理，增幅达 30.47%；76 团 TD-P₄₀ 处理和 76 团 BF-P₆₀ 处理的差异达到显著水平，较 CK 处理分别增加了 81.2%和 82.9%；77 团 TD-P₁₀₀ 和 TD-P₆₀ 处理显著高于 CK 处理，增幅分别为 29.75%和 33.12%；各生育期内，TD 处理效果更优，BF 处理下各施磷水平间无显著差异。

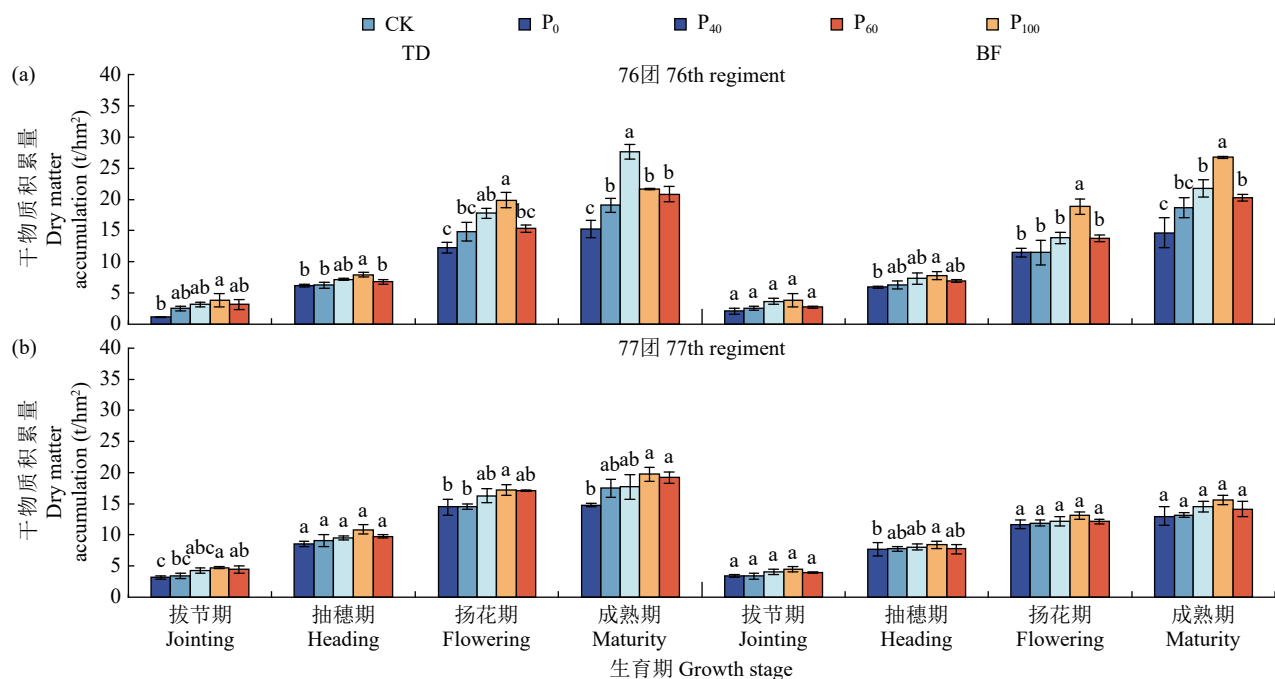


图 2 施磷方式和水平对春小麦不同生育期干物质积累量的影响

Fig.2 Effects of phosphorus application methods and levels on dry matter accumulation of spring wheat at different growth stages

综上所述，施磷方式、施磷水平及其交互作用均显著影响春小麦干物质积累量，TD 处理在促进干物质积累上整体更具优势，滴灌分次施肥（TD）结合适量常规用量 60%（P₆₀）的组合对黑土区春小麦中后期干物质积累具有协同增效的作用。

2.3 不同施磷方式下磷肥减施对滴灌春小麦产量及其构成因素的影响

由表 4~5 可知，施磷水平对 76 和 77 团的春小麦产量及其构成因素影响显著；施磷方式对于 76

团的千粒重、穗数和穗粒数，77 团的产量、千粒重、穗长和穗数具有显著影响；交互作用显著影响 76 团的穗粒数和 77 团的产量、穗粒数和穗数。

由图 3 可知，随着施磷量的增加，两试验地各处理间均呈现出产量先增加后下降的抛物线趋势。P₆₀ 处理均显著高于 CK 和 P₀ 处理，TD 处理的增产幅度为 10.0%~18.0%，BF 处理的增产幅度为 13.0%~23.0%。依据产量（y）与施磷量（x）建立一元二次回归方程（R²=0.802~0.995），产量与

表 4 施磷方式和水平对春小麦产量及其构成因素的影响

Table 4 Effects of phosphorus application methods and levels on grain yield and its components of spring wheat

地点 Location	处理 Treatment		千粒重 1000-grain weight (g)	穗数 Spike number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗长 Spike length (cm)	穗粒数 Grain number per spike	产量 Yield (kg/hm^2)
	施磷方式 M	施磷水平 L					
76 团 76th regiment	TD	CK	44.7±0.4ab	749.0±67.0ab	9.9±0.3b	24.3±0.8c	5550.0±41.0b
		P ₀	44.1±0.2b	650.0±39.0b	9.7±0.2b	25.6±0.9c	5673.0±142.0b
		P ₄₀	45.2±1.1ab	872.0±62.0a	11.0±0.2a	31.1±1.0a	6146.0±100.0a
		P ₆₀	46.5±1.0a	779.0±51.0ab	11.3±0.3a	28.7±0.9b	6565.0±193.0a
		P ₁₀₀	44.5±0.7ab	682.0±30.0b	9.6±0.1b	26.1±0.6c	5613.0±177.0b
	BF	CK	43.8±0.4a	573.0±45.0ab	9.6±0.2b	24.8±0.8c	5621.0±261.0c
		P ₀	44.3±0.9a	502.0±11.0b	10.1±0.2b	28.8±0.7b	5183.0±71.0c
		P ₄₀	44.2±1.2a	684.0±69.0ab	10.2±0.2ab	28.9±0.9b	6142.0±190.0ab
		P ₆₀	45.0±1.2a	713.0±18.0a	10.7±0.4a	31.9±0.9a	6467.0±45.0a
		P ₁₀₀	38.6±2.8b	506.0±45.0b	9.7±0.3b	29.9±1.2ab	5736.0±257.0bc
77 团 77th regiment	TD	CK	41.8±0.2b	697.0±8.0b	10.7±0.1b	24.3±0.5c	5386.0±151.0b
		P ₀	42.9±1.0ab	687.0±6.0ab	13.4±0.2a	25.9±0.9ab	5575.0±155.0b
		P ₄₀	43.7±0.8ab	745.0±10.0ab	13.5±0.2a	26.1±0.5ab	5678.0±222.0ab
		P ₆₀	45.4±1.7a	775.0±49.0a	13.5±1.3a	27.2±0.8a	6130.0±146.0a
		P ₁₀₀	41.3±1.0b	602.0±6.0c	12.6±0.2ab	26.0±0.9ab	5252.0±145.0b
	BF	CK	37.0±0.8a	620.0±11.0a	11.3±0.2b	25.0±0.9b	3553.0±279.0b
		P ₀	37.8±1.7a	626.0±32.0a	11.8±0.3ab	25.5±0.7b	3718.0±223.0ab
		P ₄₀	38.7±0.6a	633.0±12.0a	11.8±0.2ab	26.1±0.8ab	3835.0±145.0ab
		P ₆₀	39.7±0.4a	665.0±18.0a	13.4±1.4a	28.1±0.8a	4201.0±106.0a
		P ₁₀₀	38.5±0.8a	625.0±15.0a	11.0±0.2b	21.5±0.8c	2073.0±147.0c

同列不同小写字母表示同一试验地处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level among treatments in the same experimental region. The same below.

表 5 施磷方式和水平对春小麦产量及其构成因素影响差异

Table 5 The difference in the effect of phosphorus application methods and levels on grain yield and its components of spring wheat

地点 Location	变异来源 Source of variance	千粒重 1000-grain weight	穗数 Spike number	穗长 Spike length	穗粒数 Grain number per spike	产量 Yield
76 团 76th regiment	施磷方式 M	5.52*	16.68***	2.64	9.40**	2.07
	施磷水平 L	3.30*	4.68**	13.40***	14.16***	16.83***
	施磷方式 M×施磷水平 L	1.94	0.36	2.31	4.26**	1.05
77 团 77th regiment	施磷方式 M	54.10***	25.49***	4.90*	1.63	353.76***
	施磷水平 L	3.99*	7.22***	4.16**	7.42***	19.12***
	施磷方式 M×施磷水平 L	0.60	3.45*	1.46	4.13**	5.41**

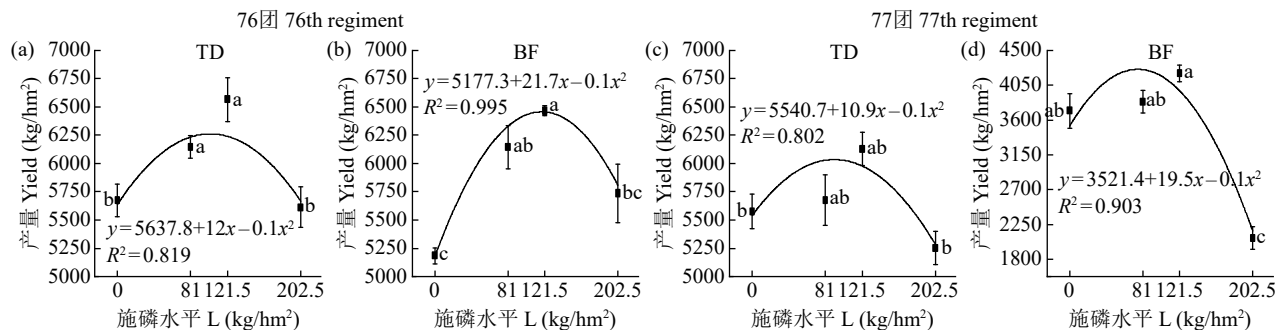


图 3 施磷方式和水平与产量的非线性回归

Fig.3 Nonlinear regression between phosphorus application methods and levels and yield

施磷量之间存在显著的相关关系。通过方程得出，76 团 TD 处理的最佳磷肥施用量为 60.0 kg/hm^2

(产量 5997.8 kg/hm^2)；BF 处理最佳磷肥施用量为 108.5 kg/hm^2 (产量 6354.5 kg/hm^2)。77

团 TD 处理最佳磷肥施用量为 54.5 kg/hm² (产量 5837.7 kg/hm²)；BF 处理最佳磷肥施用量为 97.5 kg/hm² (产量 4472.0 kg/hm²)。各处理之间产量结构存在差异，除 76 团 TD 处理穗数和穗粒数的峰值出现在 P₄₀ 处理外，其余处理均为 P₆₀ 处理最高。76 团 TD 处理的穗粒数在 P₄₀ 处理时达最大值，并较 CK 处理增加了 28.1%，而 77 团 TD 处理的穗粒数在 P₆₀ 时最高，较 CK 处理增加 12.0%。在千粒重方面，76 团 TD 和 BF 处理下 P₆₀ 较 CK 分别增加了 4.0% 和 2.7%；77 团 TD-P₆₀ 处理显著高于 BF 处理，增幅达 14.4%。

综上，施磷方式、施磷水平及其交互作用显著影响春小麦产量及其构成因素。不同试验地中，适宜的施磷量和施磷方式组合对产量提升效果不同，TD 的最佳施磷量均低于 BF 处理，最佳产量高于 BF 处理；表明 TD 处理结合适量常规用量 60% (P₆₀) 的组合可显著提高春小麦产量及其构成因素，但不同试验区表现存在差异。

2.4 不同施磷方式下磷肥减施对磷肥利用率的影响

由表 6~7 可知，施磷水平对 2 个试验地的 PFP 及 AE 均产生极显著影响；施磷方式的影响因试验地而异，对 76 团的 AE 和 77 团的 PFP 影响显著；PFP 均随减磷比例的增加而增加，各处理间均达到显著差异；76 团 TD 与 BF 处理 AE 均呈现递增趋势，P₆₀ 处理显著高于 P₁₀₀ 处理；77 团均呈现先增加后降低的趋势，P₆₀ 处理最优，其中 BF-P₆₀ 处理显著高于 BF-P₁₀₀ 处理，且 BF-P₁₀₀ 和 TD-P₁₀₀ 处理的 AE 为负值，表明磷肥过量。

表 6 施磷方式和水平对春小麦磷肥利用率的影响
Table 6 Effects of phosphorus application methods and levels on phosphorus use efficiency of spring wheat

地点 Location	处理 Treatment		PFP (kg/kg)	AE (kg/kg)
	施磷方式 M	施磷水平 L		
76 团 76th regiment	TD	P ₄₀	75.9±1.2a	5.8±1.2a
		P ₆₀	54.0±1.6b	5.6±1.2a
		P ₁₀₀	27.7±0.9c	0.3±1.2b
	BF	P ₄₀	75.8±2.4a	11.8±2.4a
		P ₆₀	53.2±0.4b	10.6±0.4a
		P ₁₀₀	28.3±1.3c	2.7±1.3b
77 团 77th regiment	TD	P ₄₀	70.1±2.7a	1.3±2.7a
		P ₆₀	50.4±1.2b	5.0±1.3a
		P ₁₀₀	25.9±0.7c	-0.7±1.6a
	BF	P ₄₀	47.3±1.8a	1.4±1.8a
		P ₆₀	34.6±0.9b	4.0±0.9a
		P ₁₀₀	10.2±0.7c	-8.1±0.7b

表 7 施磷方式和水平对春小麦磷肥利用率影响的差异
Table 7 The difference in the effect of phosphorus application methods and levels on phosphorus use efficiency of spring wheat

变异来源 Source of variance	76 团 76th regiment		77 团 77th regiment	
	PFP	AE	PFP	AE
施磷方式 M	0.01	15.54***	210.72***	4.15
施磷水平 L	568.82***	16.82***	358.46***	15.04***
施磷方式 M×施磷水平 L	0.12	0.85	3.47	3.09

综上所述，不同施磷方式、施磷水平及其交互作用对春小麦磷肥利用率影响显著；TD 处理在减磷情况下 PFP 和 AE 更具优势，尤其在 76 团，其效率较 BF 处理提高 102.5%，表明滴灌分次施肥可缓解土壤磷固定。

3 讨论

3.1 磷肥减施对春小麦生长及产量的影响

适量减磷可以稳定甚至提高春小麦产量及磷肥利用率。随着减磷比例的提高，春小麦的生长指标、干物质积累量和产量均呈先增加后降低的趋势，且多数在 P₆₀ 处理下达到最大值。其中，施用磷肥低于 121.5 kg/hm² 时各时期的春小麦的干物质积累量和磷肥施用量呈正相关，76 团 TD-P₄₀ 和 BF-P₆₀ 较 CK 处理分别显著增加 81.2% 和 82.9%，这与牛帅帅等^[15]的研究结果一致。闫蓉等^[16]和李海强等^[17]发现科学减磷能够有效平衡土壤磷素，实现稳产并提高磷肥利用率。本试验中，磷肥施用超过 121.5 kg/hm² 后，产量并未有下降，76 团 P₆₀ 较 P₁₀₀ 处理产量上升 4.1%，77 团 P₁₀₀ 处理的 AE 均为负值，表明伊犁黑土地区长时间施磷过量，农田土壤有效磷含量远远超过了作物临界值。高磷抑制春小麦生长^[18]，可能原因是高磷抑制根系对其他养分的吸收^[19]；小麦产量因根系吸收抑制和养分拮抗而下降^[20]，尤其是过量磷会固定土壤中的锌和铁等微量元素，破坏养分平衡^[21]。Li 等^[22]研究发现施用磷肥时，73.2%~88.1% 的磷肥固定在土壤中，合理的磷素水平能提高微生物磷库量以降低土壤中被固定的磷含量，因此，合适的磷素水平极大影响着春小麦生长和产量构成。2 个试验地最佳施磷量存在差异 (TD 处理 76 团 60.0 kg/hm²，77 团 54.5 kg/hm²；BF 处理 76 团 108.5 kg/hm²，77 团 97.5 kg/hm²)，可能与试验地的土壤质地与基础肥力有关，需结合土壤理化特性调整施磷策略。

3.2 施磷方式对春小麦生长及产量的影响

施磷方式对春小麦生长及产量的调控效应存在显著差异,但受土壤类型和生育期影响。在77团,底砾黑土因其较大的孔隙度和较弱的养分吸附能力,保水保肥能力差,导致TD较BF处理对磷肥的响应更明显,其中TD-P₆₀的产量较BF处理高45.9%。TD-P₆₀在抽穗期和扬花期的株高分别较BF-P₆₀高28.8%和31.3%,扬花期SPAD值增幅达14.4%;76团TD-P₆₀产量较CK处理显著增加18.3%,而BF处理的增产幅度相对较低,这与尹飞虎等^[23]和梁飞等^[24]的研究结果一致,滴灌分次施肥通过精准匹配春小麦需肥规律,可提升产量并有效降低施磷量。TD处理中,76团成熟期干物质积累量、穗数和穗粒数均在P₄₀处理达到最高,说明TD处理能有效降低春小麦对磷肥的需求量。这一差异可能与滴灌分次施肥的水肥同步特性有关,滴灌系统分次追施将水溶性磷直接输送至根区,磷和水具有复杂的协同作用,共同促进春小麦的磷素吸收,并对产量形成产生积极作用^[25]。同时TD处理分次施用更贴合春小麦需磷关键期(抽穗期至扬花期),营养生长早期的磷添加促进细胞分裂和伸长,直接影响着茎和根的生长,从而使植物能够捕获更多的磷^[26],后期磷素供应直接影响春小麦穗粒数及籽粒充实度^[27]。此外,合适的基追肥比也会使春小麦增产,生育前期建立充足的磷库至关重要,降低基肥占比反而会使小麦减产^[28]。因此,水肥一体化与分次施磷共同促进春小麦生长及产量的形成,并降低了对磷素的高依赖性,实现了增产减肥的效果。

3.3 最佳施磷量对滴灌春小麦的实践意义与适应性评价

通过回归分析得出,76团TD和BF处理的最佳施磷量分别为60.0和108.5 kg/hm²,对应产量分别为5997.8和6354.5 kg/hm²;77团TD和BF处理的最佳施磷量分别为54.5和97.5 kg/hm²,对应产量分别为5837.7和4472.0 kg/hm²。与全国小麦平均产量(7504.0 kg/hm²)^[29]相比,伊犁黑土区产量偏低,但最佳处理的PFP显著高于西北平均水平(35.53 kg/kg)^[30]。这一结果与梁飞等^[24]在北疆的研究结果(施用P₂O₅ 0~100 kg/hm²可增产15%~22%)存在差异,可能归因于土壤类型和气候条件的不同。综合考虑施磷水平和施磷方式对春小麦生长和产量的影响,本研究认为在伊犁黑土区,滴灌施磷量为81.0~121.5 kg/hm²(P₄₀~P₆₀)时,

滴灌分次施肥推荐用量为54.5~60.0 kg/hm²,一次性施基肥推荐用量为97.5~108.5 kg/hm²。

4 结论

在新疆伊犁黑土区春小麦种植地,在常规施磷量60%(121.5 kg/hm²)的基础上,使用基肥70%、抽穗期后15%和扬花期后15%的TD处理代替一次性施基肥的BF处理可降低春小麦对磷肥的依赖,能够有效提高春小麦的各项生长指标,并达到明显的增产减肥效果,76团的成熟期干物质积累量、穗数和穗粒数即使在常规施磷量40%(81.0 kg/hm²)下仍能保持,是该地区春小麦绿色生产的最佳策略。

参考文献

- [1] Li H J, Zhou Y, Xin W L, et al. Wheat breeding in Northern China: achievements and technical advances. *The Crop Journal*, 2019, 7(6): 718-729.
- [2] Khan F, Siddique A B, Shabala S, et al. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants*, 2023, 12(15): 28-61.
- [3] 王西娜, 于金铭, 谭军利, 等. 宁夏引黄灌区春小麦氮磷钾需求及化肥减施潜力. *中国农业科学*, 2020, 53(23): 4891-4903.
- [4] 刘冲, 贾永红, 张金汕, 等. 施磷量对不同播种方式下冬小麦干物质转运及养分吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(5): 975-986.
- [5] 贾兵丽, 李艳行, 杨文杰, 等. 不同降水年型磷肥对旱地冬小麦产量及磷素吸收利用的影响. *中国农业科学*, 2024, 57(16): 3192-3206.
- [6] 娄梦玉, 薛华龙, 郭彬彬, 等. 施磷水平与冬小麦产量和土壤有效磷含量的关系. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1582-1593.
- [7] 万晓菊, 张国强, 王克如, 等. 北疆春玉米覆膜、滴灌技术效应研究. *作物杂志*, 2019(4): 107-112.
- [8] 梁辉, 章建新, 薛丽华, 等. 水氮后移条件下滴灌量对新农豆2号根系生长及产量的影响. *作物杂志*, 2025(3): 233-240.
- [9] 石雄高, 裴雪霞, 党建友, 等. 小麦微喷(滴)灌水肥一体化高产优质高效生态栽培研究进展. *作物杂志*, 2022(1): 1-10.
- [10] 汤明亮, 沈重阳, 陈署晃, 等. 新疆小麦、玉米的产量和氮磷钾肥利用效率. *中国农业科学*, 2022, 55(14): 2762-2774.
- [11] 温蕊, 陈茜午, 赵雅杰, 等. 西北黄土高原旱作区不同地膜覆盖种植模式谷田水温效应及水分利用效率研究. *作物杂志*, 2022(6): 111-117.
- [12] 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(1): 73-85.
- [13] 李刚, 张祥池, 李诚, 等. 不同供磷水平对小麦苗期干旱胁迫适应性的影响. *麦类作物学报*, 2023, 43(1): 91-101.
- [14] 杨玉海, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 伊犁河流域土壤分布规律及其对土地开发的意义. *新疆农业科学*, 2008, 45(3): 25-28.
- [15] 牛帅帅, 郭大勇, 杜鹃, 等. 磷肥种类及施磷水平对冬小麦生长发育和土壤磷库的影响. *麦类作物学报*, 2024, 44(8): 1048-1055.
- [16] 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(7): 1265-1279.
- [17] 李海强, 祁帅, 李改民, 等. 关中土区冬小麦-夏玉米体系磷

- 肥减施增效技术研究. 植物营养与肥科学报, 2023, 29(2): 300-307.
- [18] 徐孟泽, 王磊, 卢艳丽, 等. 砂质潮土长期施磷的农学效应及有效性演变. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(2): 205-215.
- [19] Arai Y, Sparks D L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: a multiscale approach. *Advances in Agronomy*, 2007, 94: 135-179.
- [20] 李巧丽, 刘朋召, 师祖姣, 等. 关中平原冬小麦临界磷浓度稀释曲线的构建与磷营养诊断. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(11): 2011-2019.
- [21] Nadeem F, Abbas S, Waseem F, et al. Phosphorus (P) and zinc (Zn) nutrition constraints: a perspective of linking soil application with plant regulations. *Environmental and Experimental Botany*, 2024, 226: 105875.
- [22] Li Y L, Xu Z, Zhang L, et al. Dynamics between soil fixation of fertilizer phosphorus and biological phosphorus mobilization determine the phosphorus budgets in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 375: 109174.
- [23] 尹飞虎, 曾胜和, 刘瑜, 等. 滴灌春麦水肥一体化肥效试验研究. 新疆农业科学, 2011, 48(12): 2299-2303.
- [24] 梁飞, 曾胜和, 张磊, 等. 北疆滴灌小麦平衡施用氮磷效应研究. 作物杂志, 2012(2): 109-111.
- [25] Meier S, Campos P, Morales A, et al. Genotypic responses to phosphorus and water management in winter wheat: strategies to increase resource use efficiency and productivity. *Agricultural Water Management*, 2024, 295: 108762.
- [26] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L, et al. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423-447.
- [27] Lv X K, Han J, Liao Y C, et al. Effect of phosphorus and potassium foliage application post-anthesis on grain filling and hormonal changes of wheat. *Field Crops Research*, 2017, 214: 83-93.
- [28] 王月梅, 田海梅, 王西娜, 等. 引黄灌区连续减施化肥对春小麦产量稳定性的影响. 中国农业科学, 2024, 57(3): 539-554.
- [29] Liu Y X, Heuvelink G B M, Bai Z G, et al. Analysis of spatio-temporal variation of crop yield in China using stepwise multiple linear regression. *Field Crops Research*, 2021, 264: 108098.
- [30] 都江雪, 韩天富, 曲潇林, 等. 中国主要粮食作物磷肥偏生产力时空演变特征及驱动因素. 植物营养与肥科学报, 2022, 28(2): 191-204.

Effects of Phosphorus Fertilizer Reduction under Different Phosphorus Application Methods on Spring Wheat Yield and Phosphorus Use Efficiency in the Ili Black Soil Region

Fang Yihan¹, Chen Nannan¹, Wang Chang², Wang Boyuan¹, Zhang Licun^{1,3,4}, Liang Fei^{1,3,4}

¹College of Resources and Environment, Ili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China;

²Xinjiang Bainuo Agricultural Technology Co., Ltd, Kuitun 833200, Xinjiang, China;

³Institute of Resources and Ecology, Ili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China;

⁴Ili Valley Agricultural Resources and Environment Laboratory, Ili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China)

Abstract To investigate the effects of phosphorus reduction under different phosphorus application methods on the yield formation and phosphorus use efficiency of spring wheat in the Ili black soil region of Xinjiang, a two-factor split-plot field experiment was conducted in the 76th and 77th regiments of the Fourth Division of Xinjiang Production and Construction Corps. Two phosphorus application methods were established: one-time basal fertilization (BF) and drip fertigation with split applications (TD: 70% as basal, 15% after heading, and 15% after flowering). Five phosphorus levels were set, including the conventional rate (202.5 kg/ha, P₁₀₀), 60% of the conventional rate (121.5 kg/ha, P₆₀), 40% of the conventional rate (81.0 kg/ha, P₄₀), zero phosphorus application (P₀), and no fertilization (CK). The results showed that the P₆₀ treatment significantly improved phosphorus use efficiency as well as plant height, SPAD value, dry matter accumulation, and yield of spring wheat. Compared with the P₁₀₀ treatment, the P₆₀ treatment increased plant height by 8.9%-30.4% and SPAD value by 0.7%-19.1%. The TD treatment significantly enhanced phosphorus availability in the black soil region. In the two experimental areas, TD-P₆₀ increased yield by 4.9% (76th regiment) and 31.2% (77th regiment) compared with the traditional basal fertilization (BF-P₆₀). The maximum phosphorus partial factor productivity (PFP) and agronomic efficiency (AE) reached 75.9 kg/kg and 11.8 kg/kg, respectively. The TD treatment showed a more pronounced response in yield and efficiency enhancement in the gravelly subsoil black soil region (77th regiment). In conclusion, under the conditions of this study, the recommended phosphorus application rate for the BF treatment is 97.5-108.5 kg/ha, and that for the TD treatment is 54.5-60.0 kg/ha. It is recommended to prioritize the TD-P₆₀ treatment to synergistically improve spring wheat yield and phosphorus use efficiency, thereby achieving sustainable agricultural development in the Ili black soil region.

Key words Phosphorus fertilizer reduction; Phosphorus fertilizer application; Integration of water and fertilizer for drip irrigation; Ili black soil region; Spring wheat