

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

刘冲¹, 贾永红², 张金汕¹, 孙鹏¹, 罗四维¹, 王欢¹, 李鹏¹, 石书兵^{1*}

(1 新疆农业大学农学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2 新疆农业科学院奇台麦类试验站, 新疆奇台 831800)

摘要: 【目的】研究立体匀播方式下, 施磷量对冬小麦干物质、产量及养分效率的影响, 以筛选与新疆冬小麦立体匀播技术配套的适宜施磷量。【方法】以新冬 22 号为材料, 采用双因素裂区试验设计, 设播种方式为主区, 分条播 (D) 和立体匀播 (U) 两种方式; 施磷量 (P_2O_5) 为副区, 磷施用量分别为 0、60、120、180 kg/hm² (分别用 P_0 、 P_{60} 、 P_{120} 、 P_{180} 表示)。在主要生育期取植株样并测定干物质分配和转运量, 在开花期和成熟期测定植株氮、磷、钾含量, 收获后测定产量及其构成因素。【结果】与条播相比, 小麦茎秆直径和株高在立体匀播下具有显著优势 ($P < 0.05$)。4 个磷用量处理中, 干物质转运、分配及磷素转运、利用均以 P_{120} 最佳, 且产量优势明显 ($P < 0.05$)。立体匀播提高了冬小麦分蘖茎上籽粒的干物质分配、营养器官干物质转运量, 保证冬小麦将更多的氮、磷、钾向籽粒转运, 促进植株磷素转运和利用。两种播种方式均以 P_{120} 处理最有助于开花期和成熟期干物质向叶片、茎秆和叶鞘以及穗部的分配, 从而有效增加干物质转运率和干物质转运对籽粒贡献率, 进而提高经济系数, 达到高产的效果。【结论】立体匀播比常规条播更有利于小麦生长发育。采用立体匀播的冬小麦适当增加磷肥施用量, 可有效促进单位面积穗数、分蘖茎穗粒数和千粒重的提高, 进而获得高产。在本试验条件下, 施用 P_2O_5 120 kg/hm² 是兼顾冬小麦产量和养分利用效率的最佳用量。

关键词: 冬小麦; 条播; 立体匀播; 施磷量; 产量; 养分效率

Effects phosphorus application rates on dry matter translocation and nutrient uptake and utilization of winter wheat under different seeding patterns

LIU Chong¹, JIA Yong-hong², ZHANG Jin-shan¹, SUN Peng¹, LUO Si-wei¹, WANG Huan¹, LI Peng¹, SHI Shu-bing^{1*}
(1 College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2 Qitai County Wheat Experiment Station, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Qitai, Xinjiang 831800, China)

Abstract: 【Objectives】To select the suitable application rates of P that adapted to the uniform seeding technology of winter wheat in Xinjiang, changes in dry matter, yield and nutrient efficiency of winter wheat were investigated under different application levels of P. 【Methods】A field experiment with two-factor complete split-plot design was conducted, using wheat cultivar Xindong 22 as tested material. The main treatment factor consisted of two seeding ways: drill seeding pattern (D) and uniform seeding pattern (U), and sub-treatment was four P_2O_5 application levels of 0, 60, 120, and 180 kg/hm², which were represented by P_0 , P_{60} , P_{120} and P_{180} in turn. In the main growing stages, plants samples were collected for measuring dry matter distribution and transportation. At the flowering and maturity stage, plant samples were taken for measuring NPK contents. At harvest, the yield and yield components were investigated. 【Results】The stem diameter and plant height of winter wheat in uniform seeding pattern had significant advantages ($P < 0.05$) over drill seeding one. Under uniform seeding pattern and among the four P level treatments, the translocation and distribution of dry matter and the phosphorus translocation and utilization in P_{120} treatment were higher than other treatments, and the yield

收稿日期: 2019-05-21 接受日期: 2019-10-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技援疆项目 (2016E02003)。

联系方式: 刘冲 E-mail: Mr6V587@163.com; * 通信作者 石书兵 E-mail: shubshi@sina.com

advantage was significant ($P < 0.05$). The reason was that more dry matter was translocated from the vegetative organs to the seeds of the tillers, and more N, P and K were allocated into the grains and thus promoted plant phosphorus transportation and utilization. In addition, the P_{120} was the best for both seeding patterns contributed to the distribution of dry matter to leaves, stems and sheaths and panicles during flowering and maturity period, thus effectively increased the dry matter transportation rate and the contribution rate of dry matter transported to the grain, thereby increased the economic coefficient and achieved high yield. 【 **Conclusions** 】 Uniform seeding is more suitable to the growth of wheat than traditional drill seeding. The appropriate application rate of phosphorus fertilizer could promote the tillering and the allocation of dry matter and NPK nutrients to the grains in tillers, thus increase the yield consequently. Under the experimental condition, the optimum P_2O_5 application rate is 120 kg/hm^2 .

Key words: winter wheat; drill seeding; uniform seeding; phosphorus application rate; yield; nutrient efficiency

小麦在粮食生产中具有重要地位^[1], 立体匀播是基于小麦生长特性, 充分发挥个体生长和群体调控的增产技术, 创造单株营养均衡的条件, 使苗期个体营养竞争减小, 有利于健苗壮苗, 从而促进个体和群体光合作用, 达到高产高效^[2]。前人从旱地和水浇地小麦绿色增产增效技术模式^[3-4], 不同茎蘖生产力、群体光截获和辐射利用率对立体匀播的响应^[5-6], 及氮肥对小麦植株性状、旗叶光合性能及产量构成影响等方面进行了深入阐述^[7-8]。

磷是小麦产量形成所必需的营养元素, 土壤中磷对小麦产量的影响仅次于氮, 缺磷导致根系发育不良, 分蘖少, 干物质积累少, 产量低^[9]。岳寿松等^[10]和李建民等^[11]认为, 施用磷肥可使小麦显著增产, 且土壤速效磷含量越低, 施磷增产效果越明显。邢丹等^[12]、王旭东等^[13]研究表明, 磷肥的施入可促进冬小麦生长、增加植株高度, 但过量施磷会降低千粒重和收获指数。

有关磷肥对冬小麦干物质转运分配及产量的影响有较多研究, 但结合立体匀播对冬小麦干物质转运分配、产量及养分效率影响的研究尚不多见。本研究立足新疆小麦生产实际, 首次在立体匀播方式下采用不同施磷量处理, 研究对冬小麦干物质转运分配、产量及养分效率的影响, 为北疆昌吉地区立

体匀播小麦栽培提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

本试验于 2017—2018 年在新疆农业科学院奇台麦类试验站进行, 位于东经 $89^{\circ}13' \sim 91^{\circ}22'$, 北纬 $42^{\circ}45' \sim 45^{\circ}29'$, 属温带大陆性气候, 全年平均气温 5.5°C , 无霜期 153 天, 前茬作物为马铃薯, 土壤为沙壤土, pH 8.25, 供试土壤基本性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

采用双因素裂区试验设计, 以播种方式为主区, 分别为条播 (D) 和立体匀播 (U); 施磷量 (P_2O_5) 为副区, 分别为 0、60、120、180 kg/hm^2 (依次以 P_0 、 P_{60} 、 P_{120} 、 P_{180} 表示)。所用磷肥为过磷酸钙, 有效磷 $\geq 12\%$; 氮肥 (尿素, 含 N 46%) 施用量为 300 kg/hm^2 , 50% 作为底肥施入, 50% 于拔节期施入。小麦品种为新冬 22 号, 2017 年 9 月 25 日播种, 2018 年 7 月 15 日收获。播深 3—4 cm, 条播等行距 20 cm, 立体匀播等株距 6.67 cm, 均为人工播种施肥。小区面积 10 m^2 ($2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$), 3 次重复共 24 个小区, 随机区组排列, 小区间设 0.5 m 隔离区, 三叶期

表 1 供试土壤化学性质

Table 1 Basic chemical properties of test soil

土层 (cm) Soil layer	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P
0—20	24.67	0.34	1.23	6.38	29.76	9.49
20—40	24.04	0.33	1.26	9.49	34.33	10.18
40—60	12.70	0.34	0.94	9.52	31.01	10.87
60—80	8.97	0.19	0.77	8.28	21.87	5.80

基本苗为 225 万株/hm²。于分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、蜡熟期进行滴灌浇水, 灌水总量为 4500 m³/hm², 试验地四周设保护行, 其他管理措施与当地大田栽培技术一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农艺性状 于成熟期田间取样, 各处理每个小区选有代表性小麦 30 株, 游标卡尺测定茎秆直径, 直尺测定株高、各节间长度等指标, 取平均值。

1.3.2 干物质转运与分配 于拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期, 每小区连续挖取 30 株生长均匀并有代表性的样株(每个小区最边 3 行不取), 清洗后将每株地上部各器官(叶片、茎鞘、穗)与地下部根系分开, 分别装入信封袋置于恒温烘箱中 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘 24 h, 冷却后称其干物质质量。同时计算干物质转运特征参数^[14-15]:

营养器官花前贮藏干物质转运量 (kg/hm²) = 开花期干物质累积量 - 成熟期干物质累积量;

营养器官花前贮藏干物质转运率 = 花前贮藏干物质转运量 / 开花期干重 × 100%;

花前贮藏干物质转运量对籽粒的贡献率 = 花前干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100%;

花后干物质累积量 (kg/hm²) = 成熟期籽粒干重 - 营养器官开花前贮藏干物质转运量;

花后干物质对籽粒的贡献率 = 花后干物质累积量 / 成熟期籽粒干重 × 100%;

经济系数 = 成熟期籽粒产量 (kg/hm²) / 植株地上部总干物质 (kg/hm²)。

1.3.3 产量及产量构成 收获前, 每小区选 2 个有

代表性的 1 m² 调查成穗数, 另取 30 株进行室内考种, 调查穗粒数; 千粒重为晾干后数 500 粒称重, 换算成千粒重, 5 次重复求平均值; 产量测定以每小区取测产行单打单收 4 m², 脱粒及自然风干后称量, 折算为单位面积产量。

1.3.4 养分吸收与利用 于开花期和成熟期, 测定干物重后, 将粉碎待用的植株茎秆、叶片、穗轴及颖壳、籽粒样品用浓硫酸-双氧水消煮后, 植株全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定, 全磷含量采用钒钼黄比色法测定, 全钾含量采用火焰光度计法测定^[16]。计算公式^[17-18]如下:

花前营养器官磷素运转量 (kg/hm²) = 开花期营养器官磷素积累量 - 成熟期营养器官磷素积累量;

花前营养器官磷素运转率 = 花前营养器官磷素运转量 / 开花期营养器官磷素积累量 × 100%;

磷素收获指数 = 籽粒磷素积累量 (kg/hm²) / 植株总磷素积累量 (kg/hm²) × 100%;

磷肥偏生产力 (kg/kg) = 施磷区产量 / 施磷量;

磷素籽粒生产效率 (kg/kg) = 籽粒产量 / 植株总磷素积累量。

1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2013 数据处理软件进行初步分析和图表制作, 采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析, 采用新复极差多重比较法 (Duncan) 进行差异显著性检验 ($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 播种方式和施磷量对冬小麦农艺性状的影响

由图 1 可见, 主茎茎秆直径明显大于分蘖茎,

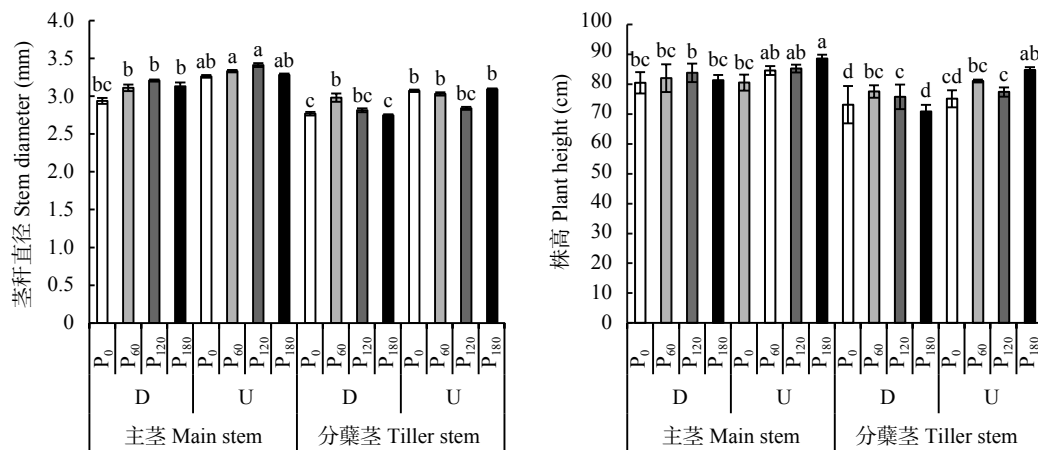


图 1 条播和立体匀播小麦不同施磷量下茎秆直径和株高

Fig. 1 Stem diameter and height of winter wheat under drill and uniform seeding with different application rates of P

[注 (Note): D—条播 Drill seeding; U—立体匀播 Uniform seeding.]

不同播种方式下立体匀播具有明显优势 ($P < 0.05$)。两种播种方式下小麦主茎高在 P_0 处理差异不显著, P_{180} 处理下立体匀播较条播明显增加; 分蘖茎也表现为相似的趋势。随着施磷量的增加, 主茎茎秆直径呈先升后降趋势, 以 P_{60} 和 P_{120} 处理较大; 相同施磷量下, 立体匀播小麦茎秆比条播更粗壮。

2.2 播种方式和施磷量对冬小麦干物质转运与分配的影响

2.2.1 冬小麦干物质转运 由表 2 可知, 与主茎相比, 分蘖茎开花期营养器官干重提高 5.92%, 成熟期营养器官干重提高 1.18%, 籽粒重提高 3.42%, 干物质转运量提高 12.61%, 干物质转运率提高 6.71%, 干物质转运对籽粒贡献率提高 16.31%, 经济系数提高 2.20%。不同播种方式下, 立体匀播小麦开花期营养器官干重、成熟期营养器官干重、籽粒重、干物质转运量、干物质转运率、干物质转运对籽粒贡献率、经济系数均高于条播, 其中, 分蘖茎占比高于主茎, 干物质转运对籽粒贡献率优势尤为显著 ($P < 0.05$)。不同施磷量下, 干物质转运量以 P_{120} 处理最高, 其中, P_{120} 处理开花期营养器官干重较 P_0 处理分别提高 26.25%, 籽粒重提高 8.03%, 干物质转运量提高 65.68%, 干物质转运率提高 30.82%, 干物质转运对籽粒贡献率提高 52.25%, 经济系数提高 3.33%。这表明立体匀播通过提高分蘖茎干物质转运占比促进冬小麦营养器官干物质转运, 合理增施磷肥增加开花期营养器官干重和分蘖茎籽粒重量, 增加干物质转运率以及干物质转运对籽粒贡献率, 本研究中 P_{120} 为实现干物质转运的最佳施磷量处理。

2.2.2 冬小麦干物质分配 表 3 显示, 成熟期营养器官干物质分配比例较开花期显著降低, 生殖器官显著升高 ($P < 0.05$)。其中, 开花期叶片、茎秆和叶鞘、穗干物质分配比例为 21.59%、55.67%、22.74%, 成熟期叶片、茎秆和叶鞘、穗轴和颖壳、籽粒干物质分配比例为 12.92%、18.31%、10.47%、58.30%, 叶片干物质分配下降 36.56%、茎秆和叶鞘下降 65.16%、穗升高 220.40%。不同播种方式下, 开花期立体匀播主茎干物质分配量较条播提高 5.01%, 分蘖茎提高 8.57%; 成熟期立体匀播主茎提高 3.30%, 分蘖茎提高 9.71%。不同施磷处理干物质分配量表现为 $P_0 < P_{60} < P_{180} < P_{120}$, 开花期 P_{60} 、 P_{120} 、 P_{180} 处理主茎较 P_0 处理分别提高 14.26%、29.67%、20.68%, 分蘖茎分别提高 9.97%、26.72%、19.32%, P_{120} 处理优势显著 ($P < 0.05$); 成熟期 P_{60} 、 P_{120} 、 P_{180} 处理主茎分

别提高 8.06%、7.97%、2.74%, 分蘖茎分别提高 5.09%、4.61%、0.46%, P_{60} 处理优势显著 ($P < 0.05$)。这表明立体匀播在增加分蘖茎的同时, 提高了分蘖茎上籽粒的干物质分配, 且适量的增施磷肥有助于开花期和成熟期干物质向叶片、茎秆和叶鞘以及穗部的分配, 达到增产效果。

2.3 立体匀播和施磷量对冬小麦产量及产量构成的影响

由表 4 可见, 相同施磷量下, 立体匀播单位面积穗数均高于条播, 除 P_{60} 处理外, 其他 3 种施磷量下立体匀播优势达显著水平 ($P < 0.05$); 在 P_0 、 P_{60} 、 P_{120} 、 P_{180} 处理立体匀播产量较条播分别提高 6.52%、2.80%、6.50%、3.28%, 优势显著 ($P < 0.05$)。随着施磷量的增加, 单位面积穗数、千粒重和产量均呈先升后降趋势, 条播下 P_{60} 处理的产量达到最高, P_{60} 、 P_{120} 、 P_{180} 处理较 P_0 处理优势显著 ($P < 0.05$), 立体匀播下 P_{120} 处理产量达到最高, 且优势显著 ($P < 0.05$)。这表明, 立体匀播更有利于提高产量构成因素, 且适宜增施磷肥可以促进产量的增长, 本试验主要通过促进单位面积穗数、分蘖茎穗粒数和千粒重的提高而影响产量。

2.4 立体匀播对冬小麦氮磷钾吸收利用的影响

2.4.1 氮 表 5 表明, 不同播种方式下, 立体匀播小麦茎秆及叶鞘、叶片、穗轴及颖壳、籽粒吸氮量较条播分别提高 19.97%、0.45%、20.93%、8.44%, 其中, 茎秆及叶鞘的差异性体现在 P_0 和 P_{180} 处理中, 叶片体现在 P_0 处理中, 籽粒体现在 P_{120} 处理中, 穗轴及颖壳的差异性不显著。

2.4.2 磷 由表 6 可知, 立体匀播茎秆及叶鞘、叶片、穗轴及颖壳、籽粒吸磷量较条播分别提高 5.05%、17.95%、38.51%、5.36%。这表明立体匀播能够促进更多的磷素转向籽粒, 施磷量过低或过高均不利于作物磷素营养吸收, P_{120} 处理可保证籽粒正常生长所需的磷营养。

2.4.3 钾 表 7 显示, 立体匀播茎秆及叶鞘、叶片、穗轴及颖壳、籽粒吸钾量较条播分别提高 15.50%、15.55%、25.07%、1.05%, 其中, 茎秆及叶鞘的差异性体现在 P_{180} 处理中, 穗轴及颖壳的差异体现在 P_0 、 P_{120} 、 P_{180} 处理中, 叶片、籽粒的差异均不显著。

2.5 立体匀播和施磷量对冬小麦磷素转运和利用的影响

由表 8 可见, 磷素转运量和磷素转运率均以穗

表 2 不同播种方式及施磷量下冬小麦营养器官干物质转运及其对产量的贡献率
 Table 2 Transport of dry matter of vegetative organs and its contribution to yield of winter wheat under different seeding patterns and P application rates

部位 Position	播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	营养器官干重 (kg/hm ²) Dry weight of vegetative organs		籽粒重 (kg/hm ²) Grain weight	干物质转运量 (kg/hm ²) Dry matter translocation	干物质转运率 (%) Dry matter translocation rate	干物质贡献率 (%) Dry matter contribution rate	经济系数 Economic coefficient	
			开花期 Flowering	成熟期 Maturity						
主茎 Main stem	条播 Drill seeding	P ₀	4617.63 ± 44.24 i	2768.32 ± 52.79 cd	3854.72 ± 25.39 j	1309.63 ± 52.74 f	26 e	31 f	0.43 c	
		P ₆₀	5153.26 ± 18.02 g	3019.05 ± 26.12 abcd	4136.06 ± 16.38 g	1873.29 ± 49.30 ef	35 de	42 ef	0.45 abc	
	立体匀播 Uniform seeding	P ₂₀	6080.70 ± 59.06 c	2936.05 ± 9.60 bcd	4203.86 ± 1.81 f	2607.30 ± 28.85 abcd	44 abcd	57 bcd	0.46 ab	
		P ₁₈₀	5485.10 ± 50.82 ef	2680.34 ± 91.96 d	4118.72 ± 9.18 g	2184.93 ± 57.74 cde	39 bcd	51 de	0.44 abc	
	分蘖茎 Tiller stem	条播 Drill seeding	P ₀	4982.67 ± 28.73 h	3673.05 ± 25.85 a	4043.32 ± 13.66 h	1849.31 ± 90.36 ef	40 abcd	47 de	0.45 abc
			P ₆₀	5401.51 ± 17.40 f	3528.22 ± 43.59 ab	4236.53 ± 3.91 ef	2134.21 ± 91.57 de	41 abcd	50 de	0.46 abc
		立体匀播 Uniform seeding	P ₂₀	5865.29 ± 19.95 d	3257.99 ± 61.83 abcd	4330.09 ± 17.60 c	3144.50 ± 50.85 a	52 a	73 a	0.46 ab
			P ₁₈₀	5612.62 ± 23.34 e	3427.69 ± 44.71 ab	4244.47 ± 8.89 def	2805.13 ± 51.30 abc	51 ab	66 abc	0.48 a
			P ₀	4735.54 ± 68.20 i	2892.53 ± 96.89 bcd	3933.59 ± 10.22 i	1843.01 ± 62.77 ef	39 bcd	48 de	0.46 abc
			P ₆₀	5390.70 ± 28.92 f	3446.70 ± 36.55 ab	4271.47 ± 13.93 de	1943.55 ± 40.82 e	36 cd	47 de	0.44 bc
分蘖茎 Tiller stem	条播 Drill seeding	P ₂₀	6128.40 ± 61.60 bc	3231.62 ± 55.86 abcd	4286.71 ± 9.51 cd	2896.78 ± 54.87 ab	47 abc	69 ab	0.47 ab	
		P ₁₈₀	5763.18 ± 20.89 d	2981.64 ± 45.50 bcd	4246.14 ± 23.00 def	2781.53 ± 64.25 abc	48 abc	68 ab	0.48 a	
	立体匀播 Uniform seeding	P ₀	5141.70 ± 47.59 g	3041.98 ± 90.49 abcd	4241.50 ± 13.73 def	2099.47 ± 43.00 de	41 abcd	52 cde	0.46 abc	
		P ₆₀	5852.86 ± 15.97 d	3397.19 ± 17.07 abc	4456.67 ± 23.78 b	2455.67 ± 18.30 bcde	42 abcd	58 bcd	0.46 ab	
	分蘖茎 Tiller stem	条播 Drill seeding	P ₂₀	6516.23 ± 32.08 a	3399.43 ± 66.10 abc	4542.42 ± 12.79 a	3116.81 ± 61.53 a	48 abc	72 ab	0.47 a
			P ₁₈₀	6229.62 ± 33.22 b	3199.05 ± 81.50 abcd	4322.50 ± 10.13 c	3030.57 ± 89.22 ab	49 ab	71 ab	0.47 a

注 (Note): 同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 3 冬小麦开花期和成熟期各器官的干物质分配 (kg/hm²)
Table 3 Dry matter distribution in different organs at flowering and maturity stages of winter wheat

部位 Position	播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	开花期 Flowering stage				成熟期 Maturity stage			
			叶片 Leaf	茎秆和叶鞘 Stem and sheath	穗 Spike	叶片 Leaf	茎秆和叶鞘 Stem and sheath	穗轴和颖壳 Spike axis and glume	籽粒 Grain	
主茎 Main stem	条播	P ₀	1184.75 ± 60.15 j	3223.33 ± 31.41 j	1088.50 ± 25.00 f	778.25 ± 8.14 k	1126.00 ± 82.90 bc	722.67 ± 25.25 bc	3854.72 ± 25.39 h	
	条播	P ₆₀	1395.00 ± 72.51 j	3681.00 ± 21.46 h	1263.20 ± 18.94 cd	869.95 ± 9.23 j	1469.20 ± 121.33 ab	729.50 ± 18.54 bc	4136.07 ± 16.38 g	
	条播	P ₁₂₀	1549.20 ± 62.87 ef	3954.58 ± 15.42 de	1609.70 ± 35.65 a	891.92 ± 3.58 def	1216.10 ± 85.6 bc	676.67 ± 48.42 bc	4203.86 ± 1.81 f	
	条播	P ₁₈₀	1454.20 ± 24.84 fg	3712.75 ± 40.67 gh	1414.10 ± 46.95 c	885.70 ± 30.34 ij	1058.60 ± 116.96 c	656.33 ± 30.98 c	4118.72 ± 9.18 g	
分蘖茎 Tiller stem	立体匀播	P ₀	1250.65 ± 55.31 ij	3390.00 ± 7.60 i	1127.90 ± 36.73 e	793.50 ± 12.95 k	1250.70 ± 39.42 bc	730.17 ± 44.00 bc	4043.32 ± 13.66 g	
	立体匀播	P ₆₀	1376.70 ± 31.03 gh	3780.17 ± 14.10 f	1375.80 ± 26.26 cd	920.25 ± 8.09 fgh	1258.40 ± 28.23 bc	751.33 ± 8.78 bc	4236.53 ± 3.91 ef	
	条播	P ₁₂₀	1716.20 ± 65.62 ab	4018.67 ± 66.67 bc	1758.90 ± 31.79 b	944.88 ± 30.55 efg	1368.70 ± 48.09 bc	727.17 ± 10.43 bc	4330.09 ± 17.60 c	
	条播	P ₁₈₀	1558.50 ± 49.51 de	3912.83 ± 13.62 de	1542.40 ± 28.47 cd	875.03 ± 5.11 ghi	1204.00 ± 41.39 bc	620.67 ± 26.20 bc	4244.48 ± 8.89 def	
分蘖茎 Tiller stem	条播	P ₀	1201.25 ± 13.78 j	3434.00 ± 5.60 i	1182.40 ± 79.96 ef	881.37 ± 2.25 ij	1353.60 ± 38.66 bc	751.67 ± 119.39 bc	3933.59 ± 10.21 h	
	条播	P ₆₀	1380.10 ± 10.93 gh	3776.42 ± 28.64 f	1317.40 ± 40.86 d	970.07 ± 49.60 cde	1279.80 ± 83.65 bc	849.00 ± 117.45 ab	4271.48 ± 13.93 de	
	条播	P ₁₂₀	1652.68 ± 34.30 bc	4428.42 ± 43.88 a	1722.70 ± 39.00 b	1085.82 ± 35.14 bc	1377.70 ± 26.77 bc	642.50 ± 19.66 bc	4286.71 ± 9.50 cd	
	条播	P ₁₈₀	1588.45 ± 77.89 cde	3902.50 ± 5.28 de	1689.00 ± 37.42 cd	962.85 ± 41.88 def	1205.00 ± 168.27 bc	532.83 ± 74.48 bc	4246.14 ± 23.01 def	
分蘖茎 Tiller stem	立体匀播	P ₀	1328.60 ± 25.41 hi	3656.75 ± 21.35 h	1671.90 ± 82.30 cd	875.17 ± 10.04 hi	1503.10 ± 100.37 ab	1097.83 ± 108.46 a	4241.50 ± 13.73 def	
	立体匀播	P ₆₀	1525.52 ± 12.87 ef	3877.50 ± 6.49 e	1841.60 ± 59.38 b	996.43 ± 23.60 cd	1621.50 ± 121.86 ab	938.50 ± 165.42 ab	4456.67 ± 23.78 b	
	条播	P ₁₂₀	1783.67 ± 34.71 a	4076.92 ± 26.39 b	2143.90 ± 15.40 a	1172.78 ± 11.95 a	1349.20 ± 103.42 abc	856.23 ± 113.59 abc	4542.42 ± 12.79 a	
	条播	P ₁₈₀	1635.90 ± 25.23 bcd	3979.33 ± 20.99 cd	2089.87 ± 46.81 b	1057.22 ± 10.92 b	1545.00 ± 116.05 ab	833.17 ± 91.82 ab	4322.50 ± 10.13 c	

注 (Note) : 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P < 0.05) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments (P < 0.05).

表 4 不同播种方式和施磷量下冬小麦产量及产量构成因素

Table 4 Yield and yield components of winter wheat under different seeding patterns and phosphorus application rates

播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	穗数 ($\times 10^4/\text{hm}^2$) Spikes	主茎穗粒数 Main stem grains per spike	分蘖茎穗粒数 Tiller stems grains per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	产量 (kg/hm^2) Yield
条播 Drill seeding	P ₀	456.33 ± 7.22 e	33.61 ± 1.68 a	23.34 ± 0.90 b	51.10 ± 0.54 bc	7690.27 ± 60.84 e
	P ₆₀	536.67 ± 13.23 cd	35.44 ± 0.99 a	25.65 ± 1.69 b	51.84 ± 0.12 abc	8276.40 ± 116.59 cd
	P ₁₂₀	590.00 ± 19.01 b	36.72 ± 0.95 a	23.18 ± 1.61 b	50.73 ± 0.40 c	8200.00 ± 64.22 cd
	P ₁₈₀	527.50 ± 22.47 d	35.00 ± 0.65 a	21.73 ± 2.05 b	50.70 ± 0.62 c	8133.33 ± 55.44 d
立体匀播 Uniform seeding	P ₀	529.17 ± 18.93 d	34.61 ± 2.71 a	30.64 ± 1.56 a	52.99 ± 0.48 ab	8192.00 ± 78.50 cd
	P ₆₀	579.33 ± 10.14 bc	36.50 ± 1.35 a	26.46 ± 0.88 ab	53.11 ± 1.09 a	8508.00 ± 55.14 b
	P ₁₂₀	644.00 ± 15.19 a	35.33 ± 0.76 a	23.97 ± 0.79 b	51.97 ± 0.61 abc	8733.33 ± 47.88 a
	P ₁₈₀	610.67 ± 6.00 ab	36.33 ± 1.02 a	25.39 ± 1.65 b	51.04 ± 0.35 c	8400.00 ± 61.96 bc

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 5 不同播种方式和施磷量下冬小麦氮吸收量 (kg/hm^2)

Table 5 Nitrogen uptake of winter wheat under different seeding patterns and P application rates

播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	茎秆及叶鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗轴及颖壳 Spike axis and glume	籽粒 Grain	总量 Total
条播 Drill seeding	P ₀	6.22 ± 0.27 b	9.32 ± 0.60 b	5.17 ± 0.13 ab	138.02 ± 8.37 b	158.74 ± 10.67 b
	P ₆₀	7.25 ± 0.87 ab	9.68 ± 0.98 b	4.62 ± 0.49 ab	140.56 ± 5.18 b	162.11 ± 9.55 b
	P ₁₂₀	5.79 ± 0.15 b	10.82 ± 0.48 ab	4.21 ± 0.22 b	134.78 ± 9.98 c	155.60 ± 5.87 c
	P ₁₈₀	5.53 ± 0.43 b	10.28 ± 0.33 ab	4.20 ± 0.16 b	152.54 ± 7.67 ab	172.55 ± 16.82 ab
立体匀播 Uniform seeding	P ₀	7.60 ± 0.73 a	8.46 ± 0.56 c	6.09 ± 0.40 ab	154.82 ± 5.63 ab	176.98 ± 18.68 ab
	P ₆₀	7.82 ± 0.51 a	9.48 ± 0.64 b	6.57 ± 0.52 a	141.21 ± 5.00 b	165.09 ± 18.00 b
	P ₁₂₀	6.92 ± 0.91 ab	11.28 ± 0.93 a	4.45 ± 0.26 ab	163.23 ± 7.59 a	185.88 ± 7.08 a
	P ₁₈₀	7.40 ± 0.65 a	11.06 ± 0.39 a	4.90 ± 0.67 ab	154.38 ± 7.38 ab	177.73 ± 8.64 ab

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

轴及颖壳最高, 叶片次之, 茎秆及叶鞘最低。立体匀播磷素收获指数、磷肥偏生产力、磷素籽粒生产效率较条播分别提高 5.66%、3.83%、3.80%。不同施磷量下, 磷素收获指数以 P₁₂₀ 最高, 磷肥偏生产力表现为 P₁₈₀ ≈ P₁₂₀ < P₆₀。这表明立体匀播可以更有效的促进植株磷素转运和利用, 且 P₁₂₀ 处理具有更高的磷素收获指数和磷素籽粒生产效率。

3 讨论

3.1 播种方式和施磷量对冬小麦农艺性状的影响

有研究表明, 条播麦田单株拥挤, 茎秆向行间倾斜, 下部叶片早衰, 基部茎节发育不良, 易倒

伏^[19]。赵广才^[20]提出小麦立体匀播技术, 每株小麦分布均匀, 占有相对均衡的土壤空间, 避免了条播行内植株间拥挤现象, 有利于小麦根系生长发育, 更好地吸收利用土壤水分和养分, 抗倒伏能力增强。适量施磷可促进小麦有效分蘖及根系发展, 增加植株高度^[12, 21]。增施磷肥可提高茎叶磷含量, 提高小麦不同生育时期的植株体内无机磷含量和茎的干物质累积量^[22-23], 但过量施磷会使养分吸收量下降^[24]。本研究表明, 立体匀播茎秆直径和株高优势显著 ($P < 0.05$), 均以 P₁₈₀ 处理达最高, 且立体匀播可有效提高分蘖茎的茎秆直径和株高。因此, 立体匀播下适宜增施磷肥对冬小麦茎秆直径和株高生长具有一定的促进作用。

表 6 不同播种方式和施磷量下冬小麦磷吸收量 (kg/hm²)

Table 6 Phosphorus uptake in winter wheat under different seeding patterns and P application rates

播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	茎秆及叶鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗轴及颖壳 Spike axis and glume	籽粒 Grain	总量 Total
条播 Drill seeding	P ₀	3.38 ± 0.31 ab	1.37 ± 0.13 ab	1.39 ± 0.08 ab	31.63 ± 1.70 b	37.78 ± 1.69 c
	P ₆₀	3.97 ± 0.26 a	1.34 ± 0.50 ab	1.21 ± 0.07 b	32.52 ± 1.45 ab	39.05 ± 1.50 bc
	P ₁₂₀	3.43 ± 0.34 ab	1.24 ± 0.21 ab	1.22 ± 0.17 b	34.31 ± 1.14 a	40.21 ± 2.67 b
	P ₁₈₀	2.88 ± 0.80 b	1.62 ± 0.09 ab	1.01 ± 0.16 b	32.97 ± 1.95 ab	38.48 ± 1.65 c
立体匀播 Uniform seeding	P ₀	4.27 ± 0.34 a	0.84 ± 0.56 b	2.07 ± 0.20 a	35.95 ± 1.18 a	43.13 ± 1.28 a
	P ₆₀	3.90 ± 0.13 a	1.08 ± 0.48 b	1.76 ± 0.12 ab	34.32 ± 3.10 a	41.07 ± 2.24 b
	P ₁₂₀	3.16 ± 0.24 ab	2.16 ± 0.05 a	1.42 ± 0.34 ab	35.86 ± 3.47 a	42.59 ± 4.32 a
	P ₁₈₀	3.02 ± 0.89 ab	2.49 ± 0.86 a	1.44 ± 0.22 ab	32.34 ± 1.52 ab	39.29 ± 1.00 bc

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 7 不同播种方式和施磷量下冬小麦不同部位钾吸收量 (kg/hm²)

Table 7 Potassium uptake in different parts of winter wheat under different seeding patterns and P application rates

播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	茎秆及叶鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗轴及颖壳 Spike axis and glume	籽粒 Grain	总量 Total
条播 Drill seeding	P ₀	38.90 ± 2.37 ab	30.69 ± 2.22 b	7.02 ± 0.17 c	15.65 ± 0.40 b	93.11 ± 2.30 b
	P ₆₀	40.59 ± 4.81 ab	39.19 ± 2.36 ab	7.87 ± 0.29 b	16.31 ± 0.22 ab	103.96 ± 7.62 ab
	P ₁₂₀	34.59 ± 1.72 ab	37.77 ± 2.22 ab	8.29 ± 0.12 b	17.52 ± 0.81 a	96.90 ± 3.39 b
	P ₁₈₀	32.32 ± 4.60 b	31.42 ± 2.80 b	8.69 ± 0.13 b	17.85 ± 0.65 a	90.51 ± 6.08 b
立体匀播 Uniform seeding	P ₀	39.64 ± 4.16 ab	31.30 ± 1.74 b	8.92 ± 0.32 ab	17.00 ± 0.66 ab	102.88 ± 3.60 ab
	P ₆₀	40.99 ± 7.22 ab	32.21 ± 2.14 b	9.32 ± 0.09 ab	17.37 ± 0.25 a	105.07 ± 10.65 ab
	P ₁₂₀	44.48 ± 5.54 a	57.21 ± 1.08 a	10.11 ± 0.15 a	17.09 ± 0.49 a	122.21 ± 18.12 a
	P ₁₈₀	43.98 ± 4.60 a	39.97 ± 3.60 ab	11.51 ± 0.26 a	16.58 ± 0.12 ab	106.86 ± 9.48 ab

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

3.2 播种方式和施磷量对冬小麦干物质与养分转运的影响

大量研究表明, 各种农艺措施对作物产量的影响大多与干物质积累及转化效率密切相关, 干物质积累转运与合理分配是提高作物产量的关键, 冬小麦的群体动态变化和干物质的转移和分配等指标对产量形成有显著影响^[25-29]。适宜施磷有利于协调营养生长与生殖生长的关系, 促进营养物质向籽粒的转移, 从而提高干物质在籽粒中的分配比例, 叶、穗器官干物质分配量大, 对籽粒形成及增产有重要意义^[30]。适宜施磷可以促进小麦苗期分蘖、根系发育, 优化群体结构, 提高小麦抗旱、抗寒能力和叶面积指数, 增加有效穗数和干物质积累^[22, 31]。本研究表明, 立体匀播提高了分蘖茎籽粒干物质分配、营养

器官干物质转运量, 保证更多氮素、磷素、钾素向籽粒转运, 促进植株磷素转运和利用。此外, P₁₂₀ 有助于开花期和成熟期干物质向叶片、茎秆和叶鞘以及穗部分配, 从而增加干物质转运率、干物质转运对籽粒贡献率, 进而提高经济系数, 达到高产效果。

3.3 播种方式和施磷量对冬小麦产量及产量构成的影响

小麦产量随播种方式不断改进而得到提高^[32-38]。赵广才等^[2]研究表明, 立体匀播把条播的边行优势升华为单株优势, 使小麦个体发育在群体增加的条件充分下充分发挥穗粒重的优势, 实现增产增收。郝德有等^[39]、张幸温等^[40]研究表明, 匀播能更加充分地利用光热资源, 通风透光性比条播更好, 植株根系更为

表 8 不同播种方式和施磷量下冬小麦植株磷素转运和利用
 Table 8 Phosphorus translocation and utilization in winter wheat under different seeding patterns and phosphorus application rates

播种方式 Seeding pattern	施磷处理 P treatment	磷素转运量 (kg/hm ²)				磷素转运率 (%)				磷素收获指数 (%) P harvest index	PPF (kg/kg)	PGPE (kg/kg)
		Amount of phosphorus translocation		Rate of phosphorus translocation		Amount of phosphorus translocation		Rate of phosphorus translocation				
		茎秆及叶鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗轴及颖壳 Spike axis and glume	茎秆及叶鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗轴及颖壳 Spike axis and glume	茎秆及叶鞘 Stem and sheath	叶片 Leaf	穗轴及颖壳 Spike axis and glume		
条播 Drill seeding	P ₀	2.85 ± 0.13 b	2.48 ± 0.09 b	4.19 ± 0.19 c	45.32 ± 1.26 ab	48.00 ± 1.38 c	72.25 ± 5.11 b	80.67 ± 0.88 ab			190.18 ± 3.27 b	
	P ₆₀	2.14 ± 0.14 bc	2.68 ± 0.19 b	6.07 ± 0.19 a	34.45 ± 2.13 c	56.87 ± 1.42 bc	76.87 ± 6.33 ab	78.29 ± 1.18 ab			110.04 ± 3.62 a	204.24 ± 7.81 ab
	P ₁₂₀	2.33 ± 0.11 bc	3.11 ± 0.11 ab	4.65 ± 0.15 c	40.24 ± 3.59 b	78.78 ± 1.46 a	80.04 ± 7.16 a	85.57 ± 1.51 a			88.58 ± 1.85 b	212.79 ± 6.72 a
	P ₁₈₀	2.21 ± 0.18 bc	3.08 ± 0.14 ab	4.34 ± 0.13 c	43.35 ± 4.99 ab	73.30 ± 1.34 ab	79.36 ± 8.12 a	85.27 ± 0.42 a			85.77 ± 2.71 b	205.82 ± 6.26 ab
立体匀播 Uniform seeding	P ₀	3.12 ± 0.13 ab	2.50 ± 0.15 b	5.32 ± 0.16 b	39.75 ± 5.74 b	64.97 ± 1.50 b	73.62 ± 1.28 ab	79.33 ± 0.23 ab			208.53 ± 5.63 ab	
	P ₆₀	1.51 ± 0.30 c	3.14 ± 0.15 ab	5.93 ± 0.18 a	31.33 ± 6.77 c	70.65 ± 1.19 ab	78.73 ± 3.31 a	76.27 ± 1.54 ab			115.69 ± 2.42 a	212.19 ± 6.66 a
	P ₁₂₀	2.75 ± 0.13 b	3.39 ± 0.14 a	5.73 ± 0.17 ab	43.78 ± 7.75 ab	72.56 ± 1.17 ab	82.69 ± 2.23 a	84.28 ± 0.37 a			90.22 ± 2.77 b	214.09 ± 6.18 a
	P ₁₈₀	3.55 ± 0.15 a	2.47 ± 0.12 b	5.67 ± 0.18 ab	53.33 ± 8.54 a	61.65 ± 1.86 b	80.99 ± 4.25 a	72.26 ± 1.09 b			89.38 ± 3.39 b	209.10 ± 4.00 ab

注 (Note): PPF—磷肥偏生产力 Partial productivity of phosphate fertilizer; PGPE—磷素籽粒生产效率 Phosphorus grain production efficiency. 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

发达, 植株与活力强, 使小麦个体能够充分有效利用土地资源, 促进了小麦产量的提高。适量施磷可提高冬小麦抗寒能力、成熟期单茎干物质积累和种子产量, 但过量施磷并不增产^[41-43]。掌握小麦磷素吸收特征及区域差异性有利于指导小麦合理施磷肥, 提高磷肥肥效, 维持小麦增产稳产^[44-45]。本研究表明, 立体匀播产量显著高于条播 ($P < 0.05$), 主要通过促进单位面积穗数、分蘖茎穗粒数和千粒重的提高而影响产量, 立体匀播下适宜增施磷肥可以促进产量的增长, 本研究以 P_{120} 处理达最高产量。因此, 匀播下 P_{120} 是兼顾干物质转运与分配、养分效率、产量的最佳组合。

4 结论

立体匀播比常规条播更有利于小麦生长发育。采用立体匀播的冬小麦, 适当增加磷肥用量可有效促进单位面积穗数、分蘖茎穗粒数和千粒重的提高, 进而获得高产。在本试验条件下, 施用 P_2O_5 120 kg/hm² 是兼顾冬小麦产量和养分效率的最佳用量。

参 考 文 献:

- [1] 石书兵. 不同生态条件下小麦品质形成的特征、调节及其生理基础[D]. 泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2005.
Shi S B. Characteristics of end-use quality formation of grains and its regulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in different ecological zones[D]. Tai'an: PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, 2005.
- [2] 赵广才, 郝德有, 常旭虹, 等. 小麦立体匀播技术[J]. *农业科技通讯*, 2015, (7): 184-186.
Zhao G C, Hao D Y, Chang X H, et al. Wheat uniform planting pattern technology[J]. *Agricultural Science and Technology Communication*, 2015, (7): 184-186.
- [3] 赵广才. 旱地小麦立体匀播绿色增产增效技术模式[A]// 中国作物学会. 中国作物学会 2015 年学术年会论文摘要集[C]. 北京: 中国作物学会, 2015.
Zhao G C. Uniform planting pattern is a green production and synergy technology model for dryland wheat[A]// Crop Science Society of China. Crop Science Society of China—2015 Academic Annual Conference Paper Abstract[C]. Beijing: Crop Science Society of China, 2015.
- [4] 赵广才. 水浇地小麦立体匀播绿色增产增效技术模式[A]// 中国作物学会. 中国作物学会 2015 年学术年会论文摘要集[C]. 北京: 中国作物学会, 2015.
Zhao G C. Uniform planting pattern is a green production and synergy technology model of irrigated wheat[A]// Crop Science Society of China. Crop Science Society of China—2015 Academic Annual Conference Paper Abstract[C]. Beijing: Crop Science Society of China, 2015.
- [5] 陶志强. 冬小麦群体光截获和辐射利用率对立体匀播的响应[A]. 中国作物学会. 2017 年中国作物学会学术年会摘要集[C]. 北京: 中国作物学会, 2017.
Tao Z Q. Response of light interception and radiation utilization of winter wheat population to stereoscopic broadcasting[A]. Crop Science Society of China. 2017 Crop Science Society of China Academic Annual Meeting Summary[C]. Beijing: Crop Science Society of China, 2017.
- [6] 陶志强, 王艳杰, 王德梅, 等. 冬小麦不同茎蘖生产力对立体匀播技术的响应[J]. *作物杂志*, 2019, (2): 110-114.
Tao Z Q, Wang Y J, Wang D M, et al. Response of productive capacity among tillers in winter wheat to tridimensional uniform sowing[J]. *Crops*, 2019, (2): 110-114.
- [7] 赵凯男. 立体匀播和氮肥运筹对小麦产量及植株性状的影响[A]// 中国作物学会. 2018 中国作物学会学术年会论文摘要集[C]. 北京: 中国作物学会, 2018.
Zhao K N. Effects of tridimensional uniform sowing and nitrogen fertilizer management on wheat yield and plant characters[A]. Crop Science Society of China. 2018 Crop Science Society of China Academic Annual Meeting Summary[C]. Beijing: Crop Science Society of China, 2018.
- [8] 赵凯男, 常旭虹, 王德梅, 等. 立体匀播和施氮量对冬小麦产量构成及旗叶光合性能的影响[J]. *作物杂志*, 2019, (1): 103-110.
Zhao K N, Chang X H, Wang D M, et al. Effects of tridimensional uniform sowing and fertilizer on grain and physiological characteristics of winter wheat[J]. *Crops*, 2019, (1): 103-110.
- [9] Han M H, Tang G M. Total amount control test of nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer on winter wheat[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(5): 1142-1144.
- [10] 岳寿松, 于振文. 磷对冬小麦后期生长及产量的影响[J]. *山东农业科学*, 1994, (1): 13-15.
Yue S S, Yu Z W. Effect of phosphorus on growth and yield of winter wheat[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1994, (1): 13-15.
- [11] 李建民, 周殿玺, 王璞, 等. 冬小麦水肥高效利用栽培技术原理[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
Li J M, Zhou D X, Wang P, et al. Principles of efficient cultivation of winter wheat in water and fertilizer[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2000.
- [12] 邢丹, 李淑文, 夏博, 等. 磷肥施用对冬小麦产量及土壤氮素利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 437-442.
Xing D, Li S W, Xia B, et al. Effects of phosphorus fertilization on yield of winter wheat and utilization of soil nitrogen[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 437-442.
- [13] 王旭东, 于振文. 施磷对小麦产量和品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2003, (6): 35-36.
Wang X D, Yu Z W. Effect of phosphorus application on wheat yield and quality[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2003, (6): 35-36.
- [14] 崔正勇, 李新华, 裴艳婷, 等. 氮磷配施对冬小麦干物质积累、分配及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(3): 339-346.
Cui Z Y, Li X H, Pei Y T, et al. Effects of nitrogen-phosphorus-combined application on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of winter wheat[J]. *Acta Agricultura Boreali-Occidentalis Sinica*, 2018, 27(3): 339-346.
- [15] 董秀春, 韩伟, 杨洪宾. 播量对冬小麦干物质积累、小穗结实性和

- 产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(9): 31-35.
- Dong X C, Han W, Yang H B. Effects of sowing amount on dry matter accumulation, seed-setting traits of spike and yield of winter wheat[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(9): 31-35.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 302-316.
- Lu R K. Soil and agricultural chemistry analysis method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 302-316.
- [17] 屈会峰, 赵护兵, 刘吉飞, 等. 不同覆盖措施下旱地冬小麦的氮磷钾需求及其生理效率[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 874-882.
- Qu H F, Zhao H B, Liu J F, et al. NPK requirements and their physiological efficiencies for winter wheat under different cover measures in dryland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(4): 874-882.
- [18] 关小康, 王静丽, 刘影, 等. 轮耕秸秆还田促进冬小麦干物质积累提高水氮利用效率[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 280-288.
- Guan X K, Wang J L, Liu Y, et al. Rotational tillage with straw returning increased dry matter accumulation and utilization efficiency of water and nitrogen in winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 280-288.
- [19] 乔蕊清, 刘新月, 卫云宗. 冬小麦撒播简化高产栽培技术的研究与应用[J]. 麦类作物学报, 2001, (3): 84-86.
- Qiao R X, Liu X Y, Wei Y Z. Study on the technique of high-yield cultivation with broadcast sowing and simplification and application in winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2001, (3): 84-86.
- [20] 赵广才. 小麦立体匀播技术绿色节本高产高效[J]. 农民科技培训, 2016, (1): 42-44.
- Zhao G C. Wheat uniform sowing pattern technology is green, high yield and high efficiency technology[J]. Science and Technology Training for Farmer, 2016, (1): 42-44.
- [21] 张文伟, 李峰, 耿智广, 等. 氮磷配比和播种量对陇东旱地冬小麦的影响[J]. 甘肃农业科技, 2017, (6): 41-43.
- Zhang W W, Li F, Geng Z G, et al. Effects of nitrogen and phosphorus ratio and seeding rate on winter wheat in dryland of Longdong[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2017, (6): 41-43.
- [22] 徐关印, 刘保明, 韩宝坤, 等. 不同供磷水平对小麦植株蔗糖含量和农艺性状的影响[J]. 核农学报, 2005, (3): 219-221, 180.
- Xu G Y, Liu B M, Han B K, et al. Effects of different levels of phosphorus fertilizer on sucrose contents and agronomic traits in wheat[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2005, (3): 219-221, 180.
- [23] 史晶. 冬小麦/夏玉米氮磷肥安全高效施肥量研究[D]. 保定: 河北农业大学博士学位论文, 2013.
- Shi J. Study on safe and efficient fertilization amount of nitrogen and phosphorus fertilizer for winter wheat/summer maize[D]. Baoding: PhD Dissertation of Hebei Agricultural University, 2013.
- [24] 孟晓瑜. 底墒和氮磷用量对旱地冬小麦产量形成、养分水分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2011.
- Meng X Y. Effect of soil moisture before sowing and nitrogen and phosphorus rates on dryland winter wheat yield formation, nutrient and water use[D]. Yangling: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2011.
- [25] 赵丹丹, 沈加印, 郎坤, 等. 宽幅精播和灌溉对冬小麦干物质积累及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 140-142.
- Zhao D D, Shen J Y, Lang K, et al. Effect of wide-precision planting and irrigation on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 140-142.
- [26] Elhani S, Martos V, Rharrabt Y, et al. Contribution of main stem and tillers to durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain yield and its components grown in Mediterranean environments[J]. Field Crops Research, 2007, 103(1): 25-35.
- [27] 王玉杰, 王永华, 韩磊, 等. 不同栽培管理模式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(5): 894-900.
- Wang Y J, Wang Y H, Han L, et al. Effects of different cultivation management models on dry matter accumulation and distribution characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(5): 894-900.
- [28] 张忠学, 于贵瑞. 不同灌溉处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 1-4.
- Zhang Z X, Yu G R. Effects of different irrigation treatments on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2): 1-4.
- [29] 王红光, 于振文, 张永丽, 等. 测墒补灌对小麦光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2495-2503.
- Wang H G, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Effects of mulching irrigation on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and distribution of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2495-2503.
- [30] 钟雯雯. 种植方式和施氮量对冬小麦光合生理特性及氮素利用的影响[D]. 泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2016.
- Zhong W W. Effects of planting patterns and nitrogen rates on photosynthetic characteristic and nitrogen utilization of winter wheat[D]. Tai'an: PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, 2016.
- [31] 孔丽红, 赵玉路, 周福平. 简述小麦干物质积累运转与高产的关系[J]. 山西农业科学, 2007, (8): 6-8.
- Kong L H, Zhao Y L, Zhou F P. The relations of the high production and the wheat dry matter accumulation and the revolution[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2007, (8): 6-8.
- [32] 焦东亮. “井字型”小麦机械化播种技术模式分析[J]. 农业开发与装备, 2015, (11): 77.
- Jiao D L. Analysis of mechanized seeding technology model of "tip-type" wheat[J]. Agricultural Development & Equipment, 2015, (11): 77.
- [33] 刘宇, 赵新华. 小麦井字型机械化播种技术在新疆且末县的应用[J]. 农业工程, 2017, 7(2): 33-34.
- Liu Y, Zhao X H. Application of well shape mechanized sowing technique for wheat in Qiemo County of Xinjiang[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(2): 33-34.
- [34] Jiang B, Zhang L, Xiong B, et al. Experiment and analysis of model selection on winter wheat seeder in Beijing area[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(S2): 1-3.
- [35] 陈国新. 小麦规范化播种技术示范推广之我见[J]. 农民致富之友, 2016, (19): 111.

- Chen G X. My opinion on the demonstration and promotion of wheat standardized seeding technology[J]. *Farmers' Friends of Riches*, 2016, (19): 111.
- [36] Chen L G, Liu H J, Shen M X, *et al.* Effects of different seeding modes on grain yield formation of wheat[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 31(4): 786–791.
- [37] 魏艳丽, 蒋会利, 王彬龙, 等. 关中地区不同播种方式对小麦产量的影响[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(17): 49–68.
- Wei Y L, Jiang H L, Wang B L, *et al.* Effects of different sowing methods on wheat yield in Guanzhong area[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, 22(17): 49–68.
- [38] 刘晨, 马荟雁. 新疆小麦新型高产高效播种模式机械化技术探索[J]. *现代农业装备*, 2016, (3): 62–66.
- Liu C, Ma H Y. Exploration on mechanization technology of new high-yield and high-efficiency seeding mode for Xinjiang wheat[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2016, (3): 62–66.
- [39] 郝德有, 郝志青. 小麦机械化匀播无垄栽培理论与技术[J]. *北京农业*, 2014, (21): 16.
- Hao D Y, Hao Z Q. Mechanized wheat sowing without ridge cultivation theory and technology[J]. *Beijing Agriculture*, 2014, (21): 16.
- [40] 张幸温, 付桂明, 刘松华, 等. 浅谈小麦精量匀播技术[J]. *河北农机*, 2015, (6): 25.
- Zhang X W, Fu G M, Liu S H, *et al.* Introduction to wheat precise seeding technology[J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2015, (6): 25.
- [41] Nie Z J, Li S Y, Hu C X, *et al.* Effects of molybdenum and phosphorus fertilizers on cold resistance in winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(5): 808–820.
- [42] 任巍, 姚克敏, 于强, 等. 水分调控对冬小麦同化物分配与水分利用效率的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, (4): 97–99.
- Ren W, Yao K M, Yu Q, *et al.* Effects of water regulation on assimilate distribution and water use efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, (4): 97–99.
- [43] 张少民, 郝明德, 柳燕兰. 黄土区长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性及土壤肥力的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(7): 159–163.
- Zhang S M, Hao M D, Liu Y L. Effects of long-term application of phosphate fertilizer on yield, nitrogen uptake and soil fertility of winter wheat in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(7): 159–163.
- [44] Cordell D, Drangert J O, White S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought[J]. *Global Environmental Change*, 2009, 19(2): 292–305.
- [45] Hilton J, Johnston A E, Dawson C J. The phosphate life-cycle: rethinking the options for a finite resource[J]. *Proceedings-International Fertilizer Society*, 2010.