

调环酸钙和施磷量对冬小麦生长、干物质积累及产量的影响

李家豪¹ 贾永红² 连世昊¹ 刘跃¹ 于 姗¹
田文强¹ 王子骞¹ 张金汕¹ 石书兵¹

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

摘 要 为明确冬小麦对调环酸钙和磷肥复合调控的响应, 以新冬 18 号为材料, 采用双因素裂区试验设计, 设叶面喷施调环酸钙为主区 (A1: 300 g/hm², A2: 600 g/hm², A3: 900 g/hm²), 施磷量 (P₂O₅) 为副区 (P1: 90 kg/hm², P2: 120 kg/hm², P3: 150 kg/hm², P4: 180 kg/hm²), 研究不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦农艺性状、叶绿素相对含量 (SPAD 值)、干物质积累与分配及产量的影响。结果表明, 同一施磷量下, A3 处理对冬小麦株高和节长有显著抑制效果, 其叶面积指数 (LAI)、SPAD 值、成熟期地上部植株干物质积累量、节直径和产量均高于 A1 和 A2, 且分别提高了 11.89%~15.60%、0.26%~12.18%、3.69%~8.32%、1.02%~5.15%、1.29%~4.02%。相同剂量调环酸钙下, LAI、SPAD 值、干物质积累量、株高和节长都以 P3 处理最高, 表现为 P3>P4>P2>P1; 产量以 A3P3 处理最高 (8120.04 kg/hm²)。因此, 在本试验下, 调环酸钙 900 g/hm² 与施磷量 150 kg/hm² 为最佳组合, 可作为北疆地区小麦增产的合理用量。

关键词 冬小麦; 调环酸钙; 施磷量; 生长; 干物质积累与分配

植物生长调节剂在当前农业生产中被广泛应用, 对小麦等作物的生长调节、品质改善及产量提高等方面发挥了重要作用^[1]。调环酸钙是一种新型环己烷三酮类植物生长调节剂, 在植物体内通过阻止 GA₂₀ 向 GA₁ 的转化, 从而抑制了活性赤霉素的合成^[2-3], 影响植物细胞的伸长, 缩短植物的茎秆^[4]。李瑞等^[5]研究发现喷施一定浓度的调环酸钙可以有效抑制黄瓜株高增加, 提高壮苗指数, 促进光合作用, 提高叶片叶绿素含量。同时, 调环酸钙能维持和延长体内既存赤霉素的活性水平, 可有效防治作物早衰^[6], 促进植物生长, 从而提高作物产量。

磷是植物生长不可或缺的重要营养元素之一, 对于提高作物产量具有至关重要的作用^[7]。众所周知, 磷能够促进植物营养体的生长, 而且作物在前期所吸收的磷可以再利用, 参与新生组织的形成与代谢, 因此充足的磷素供应有利于小麦的生物量累积。岳寿松等^[8]研究表明, 施用磷肥可使小麦增产, 并且当土壤中的磷含量越低时, 施加磷肥所带来的增产效果就会越显著。邢丹等^[9]和王旭东等^[10]研究表明, 施入磷肥可有效促进冬小麦的生长并增加株高, 然而, 过量施磷会导致千粒重和收获指数降低。

国内对调环酸钙在作物上的研究主要集中在水稻^[11]、花生^[12]和高粱^[13]等作物上, 小麦上的应用探讨较少。前人在磷肥的运筹和磷素利用率等单一因素对小麦产量的影响有较多的研究, 而关于两者互作对小麦生长和产量鲜有报道。本试验设置不同剂量调环酸钙及施磷量对冬小麦进行研究, 分析了调环酸钙和磷肥对冬小麦生长及产量的影响, 为北疆地区合理施用调环酸钙及施磷量提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为新冬 18 号, 是北疆地区主栽的中强筋冬小麦品种。供试试剂为 5%调环酸钙泡腾颗粒剂, 主要成分是 3,5-二氧化-4-丙酰基环己烷羧酸钙, 由鹤壁全丰生物科技有限公司生产。磷肥为粒状重过磷酸钙, 有效磷 (P₂O₅) ≥44%, 由云南云天化股份有限公司生产。

1.2 试验地概况

试验于 2022-2023 年在新疆维吾尔自治区农业科学院奇台麦类试验站 (89°44'36"~89°44'48" E, 43°58'38"~43°59'6" N) 进行, 播种日期为 2022 年 9 月 25 日, 收获日期为 2023 年 7 月 5 日, 试验地为

作者简介: 李家豪, 主要从事小麦高产栽培研究, E-mail: 1063386140@qq.com

石书兵为通信作者, 主要从事小麦高产栽培研究, E-mail: ssb@xjau.edu.cn

基金项目: 自治区重大科技专项“干旱绿洲现代农业高效用水关键技术研究—现代灌区作物高产高效用水技术研究”(2022 A02003-6)

收稿日期: 2024-04-02; 修回日期: 2024-07-06; 网络出版日期: 2025-01-10

沙壤土，播前 0~20 cm 土壤含有机质 24.51 g/kg、碱解氮 34.22 mg/kg、速效磷 8.28 mg/kg、速效钾 85.52 mg/kg、pH 8.15。

1.3 试验设计

采用双因素裂区试验设计，设调环酸钙（A）为主区，3 个用量分别为 300（A1）、600（A2）和 900 g/hm²（A3）。试验用药 3 次，分别喷施于冬小麦拔节期前 7~10 d、孕穗期及灌浆前期，对水 450 kg/hm²，采用 3WBD-20 型背负式电动喷雾器，喷施时间为 18:00 之后。施磷量（P）为副区，分别为 90（P1）、120（P2）、150（P3）、180 kg/hm²（P4），与 K₂O 120 kg/hm²、纯氮（基追比为 5:5，追肥于拔节期施入）225 kg/hm²作底肥施入。12 个处理，3 次重复，共计 36 个小区，小区面积 10 m²（2 m×5 m）。播种方式为人工播种，采用等行距 20 cm 条播。基本苗为 300 万株/hm²，试验地四周设置保护行，灌溉方式为滴灌，其他管理措施与当地大田一致。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶面积指数（LAI）于冬小麦拔节期、孕穗期、开花期和灌浆前期各小区选取冬小麦 10 株，采用长宽系数法测定叶面积。叶面积（cm²）=叶长（cm）×叶宽（cm）×0.83；LAI=单位土地面积叶片总面积/土地面积。

1.4.2 叶绿素相对含量（SPAD 值）分别于冬小麦开花后 0、5、10、15、20、25 d 在各小区中选取 10 株冬小麦，采用 SPAD-502 型叶绿素仪测定每个植株旗叶 SPAD 值。

1.4.3 干物质积累与分配于冬小麦成熟期，在各小区取 10 株，将植株分为叶片、茎+叶鞘、颖壳+穗轴和籽粒 4 部分，放入 105 ℃烘箱中杀青 30 min，80 ℃烘干至恒重后称重，分别测定各部分的干物质积累量，取平均值。

1.4.5 株高、节长和节直径于冬小麦的拔节期、孕穗期和灌浆期取样，每个小区取 10 株，测量株高。在冬小麦的成熟期分别用直尺和电子游标卡尺测量节长和节直径。

1.4.6 测产与考种于成熟期在各小区取长势一致的 1 m²样方调查穗数并收获、脱粒和计产。另取 10 株进行室内考种，测定穗数和千粒重。

1.5 数据处理

采用 Excel 2021 和 DPS V9.50 软件进行数据统计分析，用 Duncan 法进行显著性分析，使用

Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦 LAI 的影响

由表 1 可知，随着生育进程的推进，不同处理冬小麦 LAI 先增大后减小，在孕穗期达到最高。在相同施磷量下，调环酸钙剂量越大，LAI 越大，且各时期 A1、A2、A3 差异性达到显著水平。在相同剂量调环酸钙下，增大施磷量，各生育时期 LAI 表现为 P3>P4>P2>P1。其中，在孕穗期，A3P3 处理最高，比 A3P2 和 A3P4 分别高 2.30% 和 5.64%，且达到显著水平。结果表明，增加调环酸钙用量及适当的施磷量有利于增大冬小麦 LAI。

表 1 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦 LAI 的影响
Table 1 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on LAI of winter wheat

| 处理 Treatment | | 拔节期 Jointing | 孕穗期 Booting | 开花期 Anthesis | 灌浆前期 Early grain-filling |
|--------------------------|-------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------------------|
| A1 | P1 | 4.89c | 6.14c | 5.40c | 4.68c |
| | P2 | 5.11b | 6.50b | 5.48bc | 4.96b |
| | P3 | 5.19a | 6.66a | 5.64a | 5.16a |
| | P4 | 5.12b | 6.59a | 5.55ab | 4.99b |
| | 平均值 Average | 5.08c | 6.47c | 5.52c | 4.94c |
| A2 | P1 | 5.19c | 6.74b | 5.69a | 4.93c |
| | P2 | 5.24c | 6.81ab | 5.70a | 5.15b |
| | P3 | 5.55a | 6.85a | 5.78a | 5.40a |
| | P4 | 5.33b | 6.83ab | 5.73a | 5.30a |
| | 平均值 Average | 5.33b | 6.81b | 5.73b | 5.19b |
| A3 | P1 | 5.60b | 6.87b | 5.94c | 5.42b |
| | P2 | 5.61b | 6.96b | 6.01c | 5.43b |
| | P3 | 5.80a | 7.12a | 6.52a | 5.57a |
| | P4 | 5.65b | 6.74c | 6.21b | 5.52ab |
| | 平均值 Average | 5.66a | 6.92a | 6.17a | 5.48a |
| 变异来源 Source of variation | | F 值 F-value | | | |
| A | | 101.19** | 196.65** | 584.86** | 152.18** |
| P | | 37.49** | 32.53** | 27.06** | 33.95** |
| A×P | | 3.41* | 13.82** | 6.85** | 3.34* |

同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）；ns 表示无显著性差异（ $P \geq 0.05$ ）；“*”表示有显著差异（ $P < 0.05$ ）；“**”表示有极显著差异（ $P < 0.01$ ），下同。
Different small letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level among treatments; ns indicates no significant difference at $P \geq 0.05$; “*” indicates significant difference at $P < 0.05$; “**” indicates extremely significant difference at $P < 0.01$, the same below.

2.2 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦 SPAD 值的影响

由图 1 可见，在不同处理下，随着生育进程

的推进，冬小麦叶片 SPAD 值呈先升后降的趋势，花后 5 d 达到最大，峰值出现在花后 5 d 的 A3P3 处理，为 55.8，所有处理花后 15~20 d SPAD 值下降幅度均较其他时期明显。在花后 25 d，相同施磷量下，叶片 SPAD 值均表现为 P3>P4>P2>P1。在相同剂量调环酸钙下，随着施磷量的增加，A1、A2 和 A3 均表现为先升后降，以 A2P3 和 A3P3 处

理最高，其中，在 A2 水平下，A2P3 处理分别较其他处理高 5.61%~31.84%，且与 A2P1、A2P2 和 A2P4 处理差异达显著水平。A3 水平下，A3P3 处理分别较其他处理高 6.89%~19.71%，且与 A3P1、A3P2 和 A3P4 处理差异达显著水平。结果表明，高剂量的调环酸钙和适宜的施磷量能维持冬小麦花后 SPAD 值处于较高水平，并减缓灌浆期下降

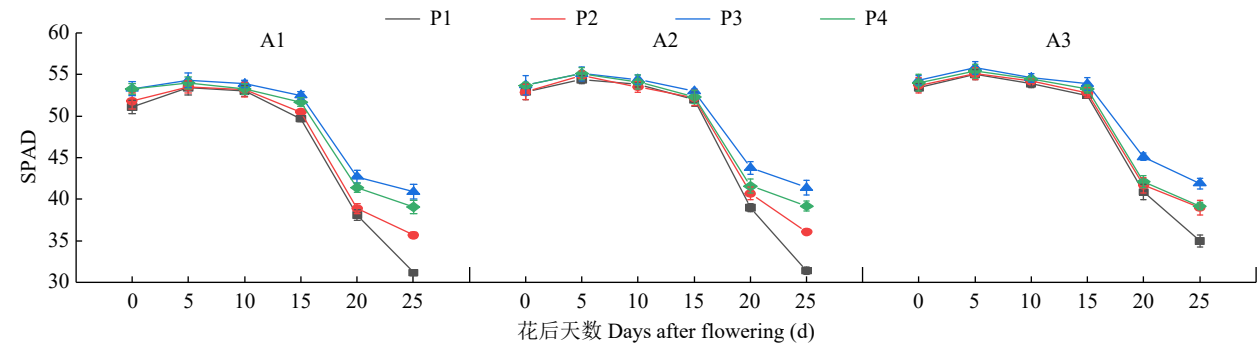


图 1 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦 SPAD 值的影响
Fig.1 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on SPAD values of winter wheat

幅度。

2.3 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦干物质积累与分配的影响

由表 2 可知，成熟期冬小麦各器官干物质占比表现为籽粒>茎+叶鞘>颖壳+穗轴>叶片。在相同施磷量下，A3 干物质积累量和籽粒干重分别比 A1 高 7.73%~8.73%和 8.80%~9.28%，A3 水平下，A3P3 干物质积累量最高，较其他处理高 2.89%~4.79%，且与 A3P1、A3P2、A3P4 处理相比

达显著水平。在同一剂量调环酸钙下，随着施磷量的增加，冬小麦植株各营养器官和籽粒干重均呈先升后降的趋势，A3 水平下，籽粒干重以 A3P3 最高，较其他处理高 3.07%~5.13%，且与 A3P1 及 A3P4 处理相比达显著水平。A1 水平下，籽粒干重以 A1P3 处理最高，较其他处理高 2.74%~4.00%，且与 A1P1、A1P4 处理相比达到显著水平。结果表明，增加调环酸钙用量及合适的施磷水平有利于冬小麦干物质向籽粒中分配。

| 表 2 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦成熟期干物质积累与分配的影响 | | | | | | | | | | |
|---|----|---|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Table 2 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on dry matter accumulation and partitioning at maturity in winter wheat | | | | | | | | | | |
| 处理 Treatment | | 干物质积累量 (g/株) Dry matter accumulation (g/plant) | 茎+叶鞘 Stem and sheath | | 叶片 Leaf | | 颖壳+穗轴 Glume and spike axis | | 籽粒 Grain | |
| | | | 干重 (g/株) Dry weight (g/plant) | 占比 Percentage (%) | 干重 (g/株) Dry weight (g/plant) | 占比 Percentage (%) | 干重 (g/株) Dry weight (g/plant) | 占比 Percentage (%) | 干重 (g/株) Dry weight (g/plant) | 占比 Percentage (%) |
| A1 | P1 | 7.62d | 2.58b | 33.90a | 0.76b | 9.99a | 1.05a | 13.40a | 3.25c | 42.71a |
| | P2 | 7.81b | 2.63ab | 33.72a | 0.79ab | 10.16a | 1.04a | 13.36a | 3.34ab | 42.81a |
| | P3 | 7.90a | 2.65a | 33.50a | 0.82a | 10.38a | 1.03a | 13.29a | 3.38a | 42.79a |
| | P4 | 7.70c | 2.61ab | 33.94a | 0.77b | 10.00a | 1.02a | 13.38a | 3.29bc | 42.73a |
| A2 | P1 | 7.86d | 2.63a | 33.46a | 0.88a | 10.18a | 1.07a | 13.57a | 3.37c | 42.92a |
| | P2 | 8.12b | 2.67a | 32.92a | 0.87a | 10.76a | 1.08a | 13.26a | 3.49ab | 42.98a |
| | P3 | 8.19a | 2.70a | 32.97a | 0.83ab | 10.69a | 1.09a | 13.33a | 3.53a | 43.01a |
| | P4 | 7.99c | 2.66a | 33.33a | 0.80b | 10.35a | 1.07a | 13.39a | 3.43bc | 42.93a |
| A3 | P1 | 8.15d | 2.65b | 32.47a | 0.91b | 11.21a | 1.08a | 13.29a | 3.51c | 43.07a |
| | P2 | 8.46b | 2.72ab | 32.19a | 0.99a | 11.74a | 1.10a | 12.96a | 3.65ab | 43.14a |
| | P3 | 8.54a | 2.73a | 31.96a | 1.00a | 11.71a | 1.12a | 13.15a | 3.69a | 43.16a |
| | P4 | 8.30c | 2.68ab | 32.25a | 0.95ab | 11.44a | 1.09a | 13.17a | 3.58bc | 43.13a |

2.4 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦株高的影响

从表 3 可知，随着生育时期推进，株高呈增长趋势，在灌浆前期达到最大。在相同施磷量下，调环酸钙剂量越大，植株矮化作用越强，株高整体表现为 A1>A2>A3。在拔节期，A3 较 A2、A1 分别矮 0.80 和 2.49 cm，且有显著性差异。在相同剂量调环酸钙下，不同施磷量株高均为先增加后降低的趋势，P3 达到最大，均呈现为 P3>P4>P2>P1。在灌浆前期，A3P1 处理株高最矮，比 A1P3 处理低 6.30%，且差异达到显著性水平。结果表明，施用调环酸钙可以降低冬小麦的株高，并且其对冬小麦株高的矮化作用会随着用量的增加而增强，适量的磷肥可以增加植株高度。

2.5 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦节长和节直径的影响

从表 4 可知，喷施调环酸钙可降低冬小麦节长，其对冬小麦伸长的抑制作用随用量的增加而增大。在相同浓度调环酸钙下，随着施磷量的增加，冬小麦节长先增加后减小，在 P3 达到最长。

表 3 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦株高的影响
Table 3 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on the plant height of winter wheat cm

| 处理 Treatment | | 拔节期 Jointing | 孕穗期 Booting | 灌浆前期 Early grain-filling |
|--------------------------|-------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
| A1 | P1 | 40.98b | 71.91c | 92.35b |
| | P2 | 41.13ab | 73.08bc | 93.52ab |
| | P3 | 42.61a | 75.78a | 95.19a |
| | P4 | 41.76ab | 74.09b | 94.58a |
| | 平均值 Average | 41.62a | 73.71a | 93.91a |
| A2 | P1 | 38.66b | 69.10c | 91.67b |
| | P2 | 39.48ab | 71.05b | 92.99ab |
| | P3 | 40.84a | 74.61a | 94.48a |
| | P4 | 40.74a | 73.47a | 93.38ab |
| | 平均值 Average | 39.93b | 72.06b | 93.13a |
| A3 | P1 | 38.11b | 68.16c | 89.19c |
| | P2 | 38.66b | 69.78b | 90.98bc |
| | P3 | 40.68a | 71.53a | 93.46a |
| | P4 | 39.07ab | 70.51ab | 92.37ab |
| | 平均值 Average | 39.13c | 69.99c | 91.50b |
| 变异来源 Source of variation | | F 值 F-value | | |
| A | | 55.50* | 269.02** | 10.18* |
| P | | 5.66* | 28.43** | 9.15** |
| A×P | | 0.31ns | 1.10ns | 0.25ns |

表 4 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦成熟期节长的影响
Table 4 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on internode length at maturity in winter wheat cm

| 处理 Treatment | | 穗颈节长 Peduncle length | 倒 2 节长 Penultimate internode length | 倒 3 节长 Antepenultimate internode length | 倒 4 节长 Fourth internode length |
|--------------------------|-------------|-------------------------|--|--|-----------------------------------|
| A1 | P1 | 32.33a | 21.04a | 13.87a | 12.24a |
| | P2 | 32.73a | 21.31a | 13.93a | 12.31a |
| | P3 | 33.21a | 21.92a | 14.36a | 12.77a |
| | P4 | 33.01a | 21.81a | 14.14a | 12.50a |
| | 平均值 Average | 32.82a | 21.52a | 14.08a | 12.45a |
| A2 | P1 | 31.06a | 20.01a | 13.27a | 11.43a |
| | P2 | 31.46a | 20.35a | 13.39a | 11.57a |
| | P3 | 32.01a | 20.54a | 13.51a | 12.03a |
| | P4 | 31.95a | 20.38a | 13.77a | 11.69a |
| | 平均值 Average | 31.62b | 20.32b | 13.49b | 11.68b |
| A3 | P1 | 30.44a | 19.23a | 12.72a | 10.46a |
| | P2 | 30.74a | 19.61a | 12.91a | 10.69a |
| | P3 | 31.39a | 19.91a | 12.97a | 11.05a |
| | P4 | 31.27a | 19.84a | 13.05a | 10.81a |
| | | 30.96b | 19.65b | 12.91c | 10.75c |
| 变异来源 Source of variation | | F 值 F-value | | | |
| A | | 19.57* | 12.17* | 25.69* | 18.87* |
| P | | 2.91ns | 1.20ns | 0.47ns | 1.83ns |
| A×P | | 0.02ns | 0.06ns | 0.07ns | 0.02ns |

从对各节间的调控作用来看，调环酸钙对穗颈节的伸长抑制作用最为明显，次之为倒 2 节。A1 穗颈节和倒 2 节与 A2、A3 相比有显著性差异，其中 A3P1 处理长度最短，与 A3P1 无显著性差异。

从表 5 可知，调环酸钙对冬小麦节直径的增长有促进作用，随着用量的增加，节直径也逐渐增大，其中倒 2 节直径最大。在相同调环酸钙处理下，随着施磷量的增加，冬小麦节直径呈先增加后减小。

表 5 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦成熟期节直径的影响
Table 5 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on nodal diameter at maturity in winter wheat

| 处理 Treatment | | 穗颈节直径 Peduncle internode diameter | 倒 2 节直径 Penultimate internode diameter | 倒 3 节直径 Antepenultimate internode diameter | 倒 4 节直径 Fourth internode diameter |
|--------------------------|-------------|--------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| A1 | P1 | 2.85a | 3.86a | 3.78a | 3.38a |
| | P2 | 2.91a | 3.92a | 3.82a | 3.45a |
| | P3 | 2.93a | 3.93a | 3.83a | 3.45a |
| | P4 | 2.87a | 3.89a | 3.81a | 3.41a |
| | 平均值 Average | 2.89a | 3.90b | 3.81b | 3.42b |
| A2 | P1 | 2.90a | 3.91a | 3.81a | 3.43a |
| | P2 | 2.96a | 3.96a | 3.85a | 3.49a |
| | P3 | 2.97a | 3.97a | 3.86a | 3.50a |
| | P4 | 2.96a | 3.93a | 3.83a | 3.47a |
| | 平均值 Average | 2.95a | 3.94ab | 3.84b | 3.47ab |
| A3 | P1 | 2.97a | 3.95a | 3.86a | 3.50a |
| | P2 | 3.04a | 3.98a | 3.91a | 3.56a |
| | P3 | 3.07a | 4.02a | 3.92a | 3.57a |
| | P4 | 3.02a | 3.97a | 3.88a | 3.52a |
| | 平均值 Average | 3.02a | 3.98a | 3.89a | 3.54a |
| 变异来源 Source of variation | | F 值 F-value | | | |
| A | | 4.03ns | 5.01ns | 14.41* | 9.01* |
| P | | 2.04ns | 2.36ns | 1.49ns | 2.01ns |
| A×P | | 0.10ns | 0.05ns | 0.02ns | 0.03ns |

在倒 2 节, A3P3 处理节直径最大。A1 与 A3 相比直径增加了 2.51%, 且差异达到显著水平。A3 下, P3 比 P1 和 P2 高 1.77%~1.26%, 但各处理之间无显著性差异。

结果表明, 调环酸钙可以增加冬小麦节直径, 并对节长有抑制效果, 适量的磷肥可以增加节长和节直径。

2.6 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦产量及其构成因素的影响

从表 6 可知, 在相同施磷量下, 随着调环酸钙剂量的增加, A3 下, 冬小麦单位面积穗数与产量均高于 A2 和 A1。相同剂量调环酸钙下, 随着施磷量的增加, 穗数呈现先升高后降低的趋势, 其中以 A3P3 处理最高, 比 A3P1、A3P2 和 A3P4 处理分别高 7.18%、3.21%和 5.71%, 且达到显著水平。穗粒数和千粒重在 A1P1、A1P4 和 A2P1 处理中表现较低。相同剂量调环酸钙下, 随着施磷量的增大, 产量均呈现先升后降的趋势。A1 下, 产量以 A1P3 处理最高, 为 7883.37 kg/hm², 分别较 A1P1、A1P2 处理高 10.98%和 3.85%, 差异均达显著水平; A3 下, 产量以 A3P3 处理最高, 为 8120.04 kg/hm², 较 A3P1 处理高 10.58%, 且达显

表 6 不同剂量调环酸钙和施磷量对冬小麦产量及其构成因素的影响
Table 6 Effects of different concentrations of prohexadione-calcium and phosphorus application rate on yield and its components of winter wheat

| 处理 Treatment | | 穗数 Spikes (×10 ⁴ /hm ²) | 穗粒数 Grains per spike | 千粒重 1000-grain weight (g) | 产量 Yield (kg/hm ²) |
|-----------------------------|-------------|--|-------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| A1 | P1 | 465.67b | 38.90b | 39.76b | 7103.57c |
| | P2 | 474.33b | 40.27ab | 41.49ab | 7591.41b |
| | P3 | 494.67a | 41.20a | 41.84a | 7883.37a |
| | P4 | 488.67a | 39.73ab | 40.63ab | 7567.64b |
| | 平均值 Average | 480.83c | 40.30b | 40.93a | 7536.50b |
| A2 | P1 | 510.33c | 39.80a | 40.47a | 7250.04c |
| | P2 | 526.67b | 40.80a | 41.85a | 7673.37b |
| | P3 | 549.67a | 41.43a | 42.22a | 7900.04a |
| | P4 | 511.67bc | 40.53a | 41.27a | 7603.37b |
| | 平均值 Average | 524.58b | 40.64ab | 41.45a | 7606.71ab |
| A3 | P1 | 529.33c | 40.67a | 40.76b | 7343.37c |
| | P2 | 549.67b | 41.73a | 41.91ab | 7896.71b |
| | P3 | 567.33a | 42.13a | 43.73a | 8120.04a |
| | P4 | 536.67bc | 41.13a | 42.33ab | 7850.04b |
| | 平均值 Average | 545.75a | 40.67a | 42.18a | 7802.54a |
| 变异来源 Source of variation | | F 值 F-value | | | |
| A | | 108.30** | 4.93ns | 1.11ns | 6.44ns |
| P | | 16.53** | 3.70* | 3.26* | 153.65** |
| A×P | | 1.56ns | 0.08ns | 0.19ns | 0.85ns |

著水平。

本试验表明,增加调环酸钙剂量和一定的施磷量可以有效增加冬小麦穗数、穗粒数和千粒重,从而提高产量。

3 讨论

LAI 是小麦生长的一个重要生理指标,能够反映其光合特性。维持较高的 LAI 在整个小麦生育期,特别是在孕穗期之后,是提高小麦产量的关键因素之一^[14]。余明龙等^[15]研究认为,调环酸钙可以提高植物叶绿素含量,从而提高植株的光合能力。有研究^[16]表明,适宜的施磷量可以有效优化小麦群体结构,提高 LAI,促进干物质积累。适量施磷可改善小麦光合特性,有利于生育后期维持一定的光合面积和光合时间,延缓植株衰老^[17]。本研究表明,A3 下,冬小麦 LAI、SPAD 值均高于 A1。随着施磷量的增加,不同生育时期 P4 的 LAI 和 SPAD 值均高于 P2,与前人^[18-19]研究部分相似,这可能与磷素的吸收程度有关,土壤中的磷素含量高,作物吸收的磷素就会相应增加,进而提高了磷肥利用率。

研究^[20-21]表明,干物质的积累、转运与合理分配是提高作物产量的关键。刘冲等^[22]研究认为,适当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。本研究表明,喷施调环酸钙有利于冬小麦干物质积累,增加籽粒的占比。增施磷肥能提高冬小麦茎、叶和颖壳及穗轴的干物质分配量的比重。但高施磷量(180 kg/hm²)会减少干物质积累和对籽粒的分配,其原因可能是过多的磷素会使作物呼吸作用过于旺盛,消耗的干物质大于积累的干物质,造成繁殖器官提前发育,引起作物早熟^[23]。

薛晓敏等^[24]研究认为施用调环酸钙可明显矮化植株,降低节间长度,增加茎粗。而赵东生^[25]研究认为施用不同剂量调环酸钙对小麦株高、各节间长和茎粗的影响不大,没有起到明显的抑制作用。刘桂荣等^[26]研究表明,适量施用磷肥能促进小麦的生长发育,小麦株高平均增加 2.4 cm。本研究表明,施用调环酸钙可降低植株高度和节间长度,增加节直径,并且随着剂量的增加效果更明显,这与郭世保等^[27]研究结果一致,施用磷肥能增加小麦株高,但过多的磷肥会减少植株高度。

小麦的产量构成因素主要由单位面积穗数、穗

粒数和千粒重组成。合理施用植物生长调节剂能增强植株对有机物的利用和转运功能,提高作物产量。薛晓敏等^[24]研究认为调环酸钙在控旺的同时,在单位面积穗数、穗粒数、千粒重等产量构成要素和产量指标上有优异的表现。施肥量与小麦生长发育和产量形成密切相关。李裕元等^[28]试验表明,单施磷可显著提高小麦的生物产量、籽粒产量和穗粒重,还可显著提高单株成穗数和单株粒数。随施磷量的增加,穗粒数和成穗数提高,最终产量受施磷水平影响更为明显^[29]。陆梅等^[30]研究认为,当土壤有效磷含量超过作物的需求水平,磷肥的增加不仅会导致千粒重降低,还会降低收获指数。本研究表明,喷施调环酸钙可以有效增加单位面积穗数、穗粒数和千粒重,从而实现增产。施磷有利于促进植株的营养生长与生殖生长,从而提高单位面积穗数、穗粒数和千粒重,达到高产,但过多的磷会对小麦生长产生抑制作用,造成减产,这与前人^[31-32]研究结果一致。

4 结论

调环酸钙能增加冬小麦的叶面积、SPAD 值和干物质积累量,矮化植株,降低节间长度,增大茎粗,提高单位面积穗数、穗粒数和千粒重。适量施用磷肥可以提高冬小麦的产量。综合不同剂量调环酸钙及施磷量对冬小麦生长、干物质积累与分配及产量的影响,北疆地区冬小麦调环酸钙用量 900 g/hm² 和施磷量 150 kg/hm² 的组合表现最优。

参考文献

- [1] 陈俊华,郭世保,徐雪松,等. 5%调环酸钙泡腾颗粒剂对小麦的调控作用. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 143-146.
- [2] Medjdoub R J A. Inhibition of vegetative growth in red apple cultivars using prohexadione-calcium. The Journal of Horticultural Science Biotechnology, 2005, 80(2): 263-271.
- [3] Vavilala D T, Reddy S, Sachchidanand, et al. Prohexadione, a plant growth regulator, inhibits histone lysine demethylases and modulates epigenetics. Toxicology Reports, 2014, 1: 1152-1161.
- [4] Paulson G S, Hull L A, Biddinger D J. Effect of a plant growth regulator prohexadione-calcium on insect pests of apple and pear. Journal of Economic Entomology, 2005(2): 423-431.
- [5] 李瑞,蒋欣梅,刘汉兵,等. 不同浓度调环酸钙对黄瓜幼苗徒长防控的影响. 中国蔬菜, 2020(3): 33-37.
- [6] 郭世保,陈俊华,徐雪松,等. 调环酸钙对小麦生长的调控作用 and 安全性. 广东农业科学, 2016, 43(3): 106-110.
- [7] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等. 长期定位施肥对土壤磷素吸持特性与淋失突变点影响的研究. 土壤通报, 2012, 43(5): 1187-1194.
- [8] 岳寿松,于振文. 磷对冬小麦后期生长及产量的影响. 山东农业科学, 1994(1): 13-15.
- [9] 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. 应用生态学报, 2015, 26(2): 437-442.
- [10] 王旭东, 于振文. 施磷对小麦产量和品质的影响. 山东农业科学, 2003(6): 35-36.
- [11] 张丰转, 姚军, 杨卫斌. 5%调环酸钙在水稻上的应用效果. 现代化农业, 2013(11): 26-27.
- [12] 杜连涛. 施用不同剂量调环酸钙对丘陵地区花生生理特性及产量的影响. 安徽农业大学学报, 2013, 40(1): 139-143.
- [13] 郭兴强, 于永静, 吕润海, 等. 调环酸钙—青鲜素复配剂对甜高粱节间生长的调控效应. 中国农业大学学报, 2009, 14(5): 29-34.
- [14] 杨卫君, 贾永红, 石书兵, 等. 播期和密度对春小麦品种新春 26 号生长及产量的影响. 麦类作物学报, 2016, 36(7): 913-918.
- [15] 余明龙, 左官强, 李瑶, 等. 调环酸钙对盐碱胁迫下大豆幼苗光合特性和保护酶活性的调节作用. 中国油料作物学报, 2019, 41(5): 741-749.
- [16] Zhou B, Qiao M, Wang Z Q. Effects of a long-term located fertilization on soil quality of grey desert soil. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 33-36.
- [17] 曾广伟, 林琪, 姜雯, 等. 不同土壤水分条件下施磷量对小麦干物质积累及耗水规律的影响. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 849-854.
- [18] 周毅, 汪建飞, 邢素芝, 等. 解磷微生物有机肥对冬小麦产量形成的影响. 麦类作物学报, 2013, 33(3): 526-529.
- [19] 王瑜, 李增嘉, 宁堂原, 等. 水、磷对冬小麦旗叶特性的影响. 青岛农业大学学报 (自然科学版), 2008, 25(3): 177-183.
- [20] 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. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 1-4.
- [21] 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. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2495-2503.
- [22] 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.
- [23] 耿玉辉, 曹国军, 叶青, 等. 磷肥不同施用方式对土壤速效磷及春玉米磷素吸收和产量的影响. 华南农业大学学报, 2013, 34(4): 470-474.
- [24] 薛晓敏, 林开创. 5%调环酸钙泡腾颗粒剂对小麦生长及产量影响. 河南农业, 2022(1): 40-41.
- [25] 赵东生. 调环酸钙调控水稻小麦生长的研究. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- [26] 刘桂荣, 肖慧, 陈月平. 磷肥对小麦生长发育及其产量的影响. 农业工程技术, 2018, 38(29): 14, 17.
- [27] 郭世保, 徐雪松, 王朝阳, 等. 调环酸钙对小麦群体性状和产量的调控作用. 湖北农业科学, 2016, 55(7): 1706-1709.
- [28] 李裕元, 郭永杰, 邵明安. 施肥对丘陵旱地冬小麦生长发育和水分利用的影响. 干旱地区农业研究, 2000(1): 15-21.
- [29] 郑彩霞, 张富仓, 张志亮, 等. 限量灌水和施磷对冬小麦养分吸收及利用的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 102-107.
- [30] 陆梅, 孙敏, 高志强, 等. 不同施磷水平对旱地小麦产量及其构成要素的影响. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 13-19.
- [31] Nie Z J, Li S Y, Hu C X, et al. Effects of molybdenum and phosphorus fertilizers on cold resistance in winter wheat. Journal of Plant Nutrition, 2015, 38(5): 808-820.
- [32] 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. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2007, 35(7): 159-163.

Effects of Prohexadione-Calcium and Phosphorus Application Rate on the Growth, Dry Matter Accumulation, and Yield of Winter Wheat

Li Jiahao¹, Jia Yonghong², Lian Shihao¹, Liu Yue¹, Yu Shan¹,
Tian Wenqiang¹, Wang Ziqian¹, Zhang Jinshan¹, Shi Shubing¹

(¹College of Agronomy of Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;

²Qitai County Wheat Experiment Station, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Qitai 831800, Xinjiang, China)

Abstract To study the response of winter wheat to the compound regulation of prohexadione-calcium and phosphorus fertilizer, take Xindong 18 as the material, a two-factor split-zone test design was used, set up foliar spraying of prohexadione-calcium main plot (A1: 300 g/ha, A2: 600 g/ha, A3: 900 g/ha); the amount of phosphorus applied (P₂O₅) was the subplot (P1: 90 kg/ha, P2: 120 kg/ha, P3: 150 kg/ha, P4: 180 kg/ha). The effects of different doses of prohexadione-calcium and phosphorus application on agronomic traits, relative content of chlorophyll (SPAD value), dry matter accumulation and distribution and yield of winter wheat were studied. The results showed that under the same phosphorus application rate, A3 treatment had a significant inhibitory effect on winter wheat plant height and node length, its leaf area index (LAI), SPAD value, dry matter accumulation, node diameter, and yield were all higher than A1 and A2, and increased by 11.89%-15.60%, 0.26%-12.18% and 3.69%-8.32%, 1.02%-5.15% and 1.29%-4.02%, respectively. At the same dose of prohexadione-calcium, LAI, SPAD value, dry matter accumulation, and plant height and node length were all highest in P3, with the size of P3>P4>P2>P1; the A3P3 treatment produced the most (8120.04 kg/ha). Accordingly, the northern border area can benefit from a moderate dosage of prohexadione-calcium (900 g/ha) and phosphorus treatment (150 kg/ha) to boost yields under this experiment.

Key words Winter wheat; Prohexadione-calcium; Phosphorus application rate; Growth; Dry matter accumulation and distribution