

# 植物生长延缓剂对新疆高产冬小麦 群体特征及抗倒性的影响

罗霄<sup>1</sup>,康文婧<sup>1</sup>,刘琪<sup>1</sup>,甘长波<sup>1</sup>,何绍冬<sup>1</sup>,聂迎彬<sup>2</sup>,孔广超<sup>1</sup>

(1.石河子大学农学院/新疆兵团绿洲生态农业重点实验室,新疆石河子 832003;

2.新疆农垦科学院作物研究所,新疆石河子 832000)

**摘要:**以高产冬小麦品种‘新冬52号’为材料,分别采用4 500、5 250、6 750、9 000 mL·hm<sup>-2</sup>浓度矮壮素及225、375、525 g·hm<sup>-2</sup>浓度麦搏进行叶面喷施,以喷施等量清水为对照,探究植物生长延缓剂种类及用量对小麦群体茎蘖数、株高、叶面积指数、粒叶比、干物质积累量、茎秆抗倒相关性状及籽粒产量的影响。结果表明:喷施5 250 mL·hm<sup>-2</sup>矮壮素、225 g·hm<sup>-2</sup>与525 g·hm<sup>-2</sup>麦搏的小麦有效穗数均值为645.12万株·hm<sup>-2</sup>、穗粒数均值为45.76粒、千粒重均值为56.37 g,较对照分别提高3.34%、4.03%和13.48%;其茎蘖成穗率介于49.57%~52.16%,群体干物质积累量均值为36 555.08 kg·hm<sup>-2</sup>,单株干物质积累快速增长长期平均持续天数为39.6 d,生育期最大叶面积指数介于8.8~9.6;粒数叶比及粒重叶比均值分别为0.41粒·cm<sup>-2</sup>和23.27 mg·cm<sup>-2</sup>,较对照分别提高1.28%和16.13%;三个处理下小麦籽粒产量最高,分别较对照显著提高18.38%、22.24%和24.03%。此外,9 000 mL·hm<sup>-2</sup>矮壮素和525 g·hm<sup>-2</sup>麦搏喷施处理均能降低小麦株高并促使整株重心下移,小麦花后20 d时茎秆倒伏指数及基部节间占比均值分别较对照降低36.74%和22.01%,同时增强茎粗和茎秆充实度,改善了茎秆形态,提高了植株抗倒伏能力及群体通风透光能力。

**关键词:**冬小麦;矮壮素;麦搏;群体特征;抗倒性;产量

**中图分类号:**S512.1; S143.8 **文献标志码:**A

## Effects of plant growth retardants on population characteristics and lodging resistance of high yield winter wheat in Xinjiang

LUO Xiao<sup>1</sup>, KANG Wenjing<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, GAN Changbo<sup>1</sup>,

HE Shaodong<sup>1</sup>, NIE Yingbin<sup>2</sup>, KONG Guangchao<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Key Laboratory for Oasis Eco-Agriculture, Xinjiang

Production and Construction Corps, Shihezi, Xinjiang 832003, China; 2. Institute of Crop Research,

Xinjiang Academy of Agri-Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** The high yield winter wheat variety ‘Xindong 52’ was used in this research, wheat seedlings were sprayed with two types of growth retardants of four Cycocel concentrations of 4 500, 5 250, 6 750 mL·hm<sup>-2</sup>, and 9 000 mL·hm<sup>-2</sup>, as well as three Maibo concentrations of 225, 375 g·hm<sup>-2</sup>, and 525 g·hm<sup>-2</sup>, respectively, and the same amount of water was sprayed at the same time as the control. The effects of plant growth retardants on the number of stems and tillers, leaf area index, grain to leaf ratio, dry matter accumulation, lodging resistance and yield of wheat population was investigated and analyzed. The results showed that under the 5 250 mL·hm<sup>-2</sup>, 225 g·hm<sup>-2</sup> and 525 g·hm<sup>-2</sup> treatments, the average spike number of wheat was 6.45×10<sup>6</sup> per hectare, the average number of grains number per spike was 45.76, and the average 1 000-grain mass was 56.37 g, 3.34%, 4.03%, and 13.48% higher than the control, respectively. The tillering rate ranged from 49.57% to 52.16%. The average

收稿日期:2024-03-31

修回日期:2024-05-11

**基金项目:**新疆生产建设兵团重点领域科技攻关项目(2024AB006);新疆小麦产业技术体系项目(XJARS-01-016);新疆生产建设兵团农业科技创新工程专项(NCG202305)

**作者简介:**罗霄(1999-),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为作物高产栽培及化控技术。E-mail:1460467404@qq.com

**通信作者:**孔广超(1970-),男,陕西宝鸡人,教授,主要从事作物遗传育种研究。E-mail:kgch001@126.com

dry matter accumulation in population was  $36\ 555.08\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The rapid growth period of average dry matter accumulation per plant was 39.6 days, and the maximum leaf area index was 8.8 to 9.6. The average grain number-leaf area was  $0.41\ \text{grains} \cdot \text{cm}^{-2}$  and grain mass-leaf area ratio was  $23.27\ \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , which increased by 1.28% and 16.13% compared with the control, respectively. The highest grain yields were observed in the above three treatments, which were 18.38%, 22.24% and 24.03% higher than the control, respectively. The treatment of  $9\ 000\ \text{mL} \cdot \text{hm}^{-2}$  Cycocel and  $525\ \text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$  Maibo significantly reduced the height of 'Xindong 52' and decreased the gravity center of wheat plant. Under these two treatments, the average stem lodging index and the proportion of basal internode ratio of wheat at 20 days after flowering were reduced by 36.74% and 22.01% respectively compared with the control, increased stem diameter and improved stem morphology, and enhanced plant lodging resistance and population ventilation and light transmission capacity.

**Keywords:** winter wheat; Cycocel; Maibo; population characteristics; lodging resistance; yield

小麦是我国重要的粮食作物之一,其中新疆地区小麦种植面积和产量近年来持续增加<sup>[1]</sup>。2022年新疆小麦播种面积与总产量分别为  $1.15 \times 10^6\ \text{hm}^2$  与  $6.53 \times 10^9\ \text{kg}$ , 分别占全疆粮食播种总面积的 47.40% 与粮食总产量的 36.03%<sup>[2]</sup>。2023年新疆冬小麦千亩连片实收平均单产达  $11\ 743.5\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 刷新了全国小麦大面积单产最高纪录<sup>[3]</sup>, 新疆生产建设兵团高产品种‘新冬 52 号’最高单产达  $13\ 472.85\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[4]</sup>。然而,当前对于新疆高产小麦群体特征仍缺乏深入研究,探讨该地区小麦高产群体特征、集成高产栽培技术,对保障我国粮食安全具有重要意义。

群体质量是衡量作物群体结构与产量构成因素间关系的重要指标<sup>[5]</sup>,合理的叶面积指数是表征高产小麦群体质量的基础指标,较长的花后高效光合速率持续期是小麦高产的生理指标,合理的粒叶比与茎蘖成穗率分别是综合指标及诊断指标,适宜的干物质积累量是核心指标<sup>[6]</sup>。株高、叶倾角及叶片空间布局等形态因素可影响小麦群体内光的分配,进而影响小麦群体生长、光能截获及光合效能<sup>[7]</sup>。倒伏是影响小麦生产及生育后期群体结构的关键因素,其不仅能改变植株冠层结构、减少光截获量,还会影响光合作用、阻碍营养物质运输,导致小麦大幅减产<sup>[8]</sup>。前人研究发现,植物生长延缓剂在改善群体结构、增强植株抗倒伏性方面发挥了重要作用<sup>[9]</sup>。在小麦起身期喷施适当浓度的矮壮素可以降低株高和重心高度,提高茎秆基部节间的抗折力,从而增强抗倒伏能力<sup>[10]</sup>。小麦拔节初期叶面喷施甲哌鎗<sup>[11]</sup>或返青期喷施调环酸钙<sup>[12]</sup>也能增强其抗倒能力。

目前有关外源植物生长延缓剂调控小麦抗倒伏性能的研究已有诸多报道<sup>[13-14]</sup>,新型植物生长延缓剂“麦搏”已应用于新疆小麦生产<sup>[15]</sup>,但其对于

高产小麦的作用机制尚不明确。因此,本研究以高产 ( $>12\ 000\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 冬小麦品种‘新冬 52 号’为材料,分析不同浓度植物生长延缓剂对小麦农艺性状、群体质量、茎秆性状、籽粒产量及抗倒伏性等性状的影响,以期总结高产小麦群体特征,筛选可有效改善小麦群体质量与抗倒性的适宜生长延缓剂及其浓度,为优化冬小麦高产高效栽培技术、提升新疆乃至全国小麦生产水平提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2022—2023 年度在新疆生产建设兵团第六师奇台农场 22 连进行,该地区海拔 1 700 m,年平均降水量 180 mm,无霜期 130 d。试验田土壤为砂壤土,前茬为马铃薯,播种前 0~60 cm 土层土壤碱解氮含量为  $82.9\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量为  $53.8\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量为  $105.6\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有机质含量为  $42.8\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 值 7.9。该地区 2022—2023 年冬小麦生长季节每月降水量及各月每日最低、最高温度平均值见图 1。

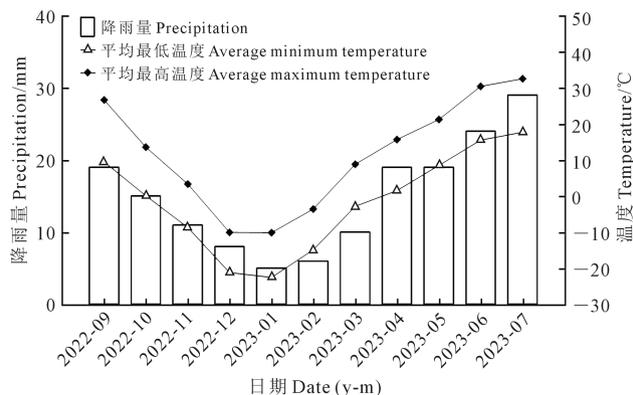


图 1 2022—2023 年小麦生长季降雨量和平均最低、最高温度  
Fig.1 Precipitation and average minimum and maximum temperature during wheat growing season in 2022-2023

## 1.2 试验材料

供试冬小麦品种为‘新冬 52 号’,由新疆金色盛源种业有限公司提供,并用菌利剑拌种。供试矮壮素(2-氯-N,N,N-三甲基乙铵氯化物,简称 CCC)为有效成分 50%的水剂,由黄骅市鸿承企业有限公司生产;麦搏(MP)由 10%甲哌鎗(N,N-二甲基哌啶鎗氯化物)可溶粉剂与 5%调环酸钙(3,5-二氧代-4-丙酰基环己烷羧酸钙)泡腾粒剂组成,由鹤壁全丰生物科技有限公司生产。

## 1.3 试验设计

采用单因素随机区组试验设计,设两个延缓剂种类(CCC 和 MP),其中 CCC 分别设 4 500 mL·hm<sup>-2</sup>(C4500)、5 250 mL·hm<sup>-2</sup>(C5250)、6 750 mL·hm<sup>-2</sup>(C6750)和 9 000 mL·hm<sup>-2</sup>(C9000)4 个浓度,MP 分别设 225 g·hm<sup>-2</sup>(MP225)、375 g·hm<sup>-2</sup>(MP375)和 525 g·hm<sup>-2</sup>(MP525)3 个浓度,以同期喷施等量清水为对照(CK),共 8 个处理。MP 配施方法:分别称取甲哌鎗与调环酸钙各 50 g 溶于 8 L 水中,充分搅拌溶解形成 12.5 g·L<sup>-1</sup>母液,MP225、MP375 及 MP525 处理分别取母液 1.2、2.0、2.8 L,并分别加水 13.8、13.0、12.2 L 配成 MP 溶液,喷施量为 15 L·667m<sup>-2</sup>。各处理设 3 次重复,共 24 个小区,小区面积 40.8 m<sup>2</sup>。

小麦于 2022 年 9 月 25 日播种,采用“10 cm+20 cm”宽窄行,播种量为 375 kg·hm<sup>-2</sup>。播前施 390 kg·hm<sup>-2</sup>磷酸二铵(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥64.0%)作底肥,拔节前喷施 13%二甲四氯水剂 6 kg·hm<sup>-2</sup>进行化学除草。2023 年 4 月 6 日(冬小麦拔节前 13 d)与 2023 年 4 月 13 日(拔节前 6 d)分两次喷施矮壮素、麦搏及清水处理,每次用量均为 15 L·667m<sup>-2</sup>。全生育期采用水肥一体化技术,总灌水量 8 250 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,生育期共追施尿素(N≥46%)675 kg·hm<sup>-2</sup>、磷酸一铵(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥40%)300 kg·hm<sup>-2</sup>和硫酸钾(K<sub>2</sub>O≥52%)195 kg·hm<sup>-2</sup>。其余栽培管理与当地滴灌高产冬小麦田相同。2023 年 7 月 25 日收获。

## 1.4 测定项目与方法

1.4.1 农艺性状 各小区定点 1 m<sup>2</sup>样方,分别于冬小麦起身期、拔节期、抽穗期和开花期调查茎蘖数,成熟期调查成穗数并计算成穗率(成熟期成穗数/最大茎蘖数×100%)。使用卷尺测量地面至植株顶端生长点(穗顶端抽出后至穗顶部但不含芒)的距离为株高,并取长势一致且具代表性的单株小麦主茎,剪除根系后,于 105℃下杀青 30 min 后 80℃烘干至恒重,称重记录小麦地上部干物质积累量。

1.4.2 叶面积指数 于冬小麦起身期、拔节期、孕

穗期、抽穗期、开花期及花后 10、20、30 d,各小区取 3 株长势一致单株的主茎,剪取全部叶片,每株取最上部一片展开叶截取中部 5 cm 长样段,测量宽度后将其及本株其余所有叶片分别烘干至恒重,采用比重法计算总叶面积及叶面积指数,计算公式如下:

单位质量叶面积(cm<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>)=(样段叶宽×5)/样段干质量

样株总叶面积(cm<sup>2</sup>)=单位质量叶面积×样株叶总干质量

平均单株叶面积(cm<sup>2</sup>)=样株总叶面积/3

叶面积指数=(平均单株叶面积×小区茎蘖数)/(小区面积×10 000)

1.4.3 粒叶比 于小麦孕穗期,采用比重法计算总叶面积(孕穗期达到最大),于成熟期调查单株粒数与粒重,计算粒数叶比(粒数/总叶面积,个·cm<sup>-2</sup>)与粒重叶比(粒重/总叶面积,mg·cm<sup>-2</sup>)。

1.4.4 茎秆性状 于冬小麦开花后 20 d,取 3 株长势一致单株的主茎,自基部向上依次记为第一节间(I1),第二节间(I2)、第三节间(I3)、第四节间(I4)和第五节间(I5),用直尺分别测定各节间长和穗长后同 1.4.1 节方法测定节间干质量,采用高精度数显游标卡尺(DL91150,中国)测定各节间中部茎秆直径,采用 BJ610C 电子天平(Precisa,瑞士)和 YYD-1A 植物茎秆强度仪(托普云农,中国)分别测定单茎鲜质量及各节间茎秆抗折力;于开花期、花后 10、20 d 用直尺测定茎基部到平衡支点(含叶、鞘、穗)的距离为重心高度,计算茎壁厚度、基部(I1+I2)节间占比、茎秆充实度及茎秆倒伏指数。各指标计算公式如下:

茎壁厚度(mm)=(茎秆外径-茎秆内径)/2

基部节间占比(%)=(I1 长度+I2 长度)/节间总长度

茎秆充实度(mg·cm<sup>-1</sup>)=节间干质量/节间长

茎秆倒伏指数=茎秆重心高度×单茎鲜质量/第二节间茎秆抗折力

1.4.5 产量及其构成因素 于成熟期分别测定各小区中两行 2 m 长样方内的成穗数,脱粒后测定总粒数,计算平均穗粒数。籽粒经 80℃烘干至恒重,各小区随机取三个 500 粒称重换算为千粒重(标准水分 13%),并计算理论产量。

## 1.5 数据统计与分析

使用 Excel 2010 整理数据,采用 SPSS 20 以最小显著性差异法(LSD)进行单因素方差分析与多重比较、检验差异显著性,采用 Origin 2023 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物生长延缓剂对滴灌冬小麦群体特征的影响

2.1.1 茎蘖数 起身期~成熟期各处理小麦的茎蘖数整体呈先减少后稳定的趋势(表1),起身期茎蘖数介于1 207.83~1 296.97万株·hm<sup>-2</sup>,处理间差异不显著。从拔节期开始,各处理的茎蘖数迅速下降,其中各浓度CCC处理的茎蘖数均低于CK,且其茎蘖数均低于MP处理;抽穗期时CCC和MP各处理茎蘖数均值分别较拔节期降低18.66%和28.50%;开花期时CCC和MP各处理的茎蘖数均值分别较抽穗期降低3.35%和4.85%,处理间无显著差异;成熟期,除C9000处理外,其余处理的茎蘖数均高于600万株·hm<sup>-2</sup>。CCC和MP各处理平均成穗率分别为51.78%和50.13%,其中C6750和C4500处理成穗率分别较CK增加10.89%和5.71%,MP525处理的成穗率较CK增加5.48%。由方差分析结果可知,植物生长延缓剂种类显著影响拔节期和抽穗期茎蘖数,延缓剂种类和浓度的交互作用对成熟期茎蘖数的影响达显著水平。

2.1.2 地上部干物质积累量 各处理小麦群体地上部干物质积累量在拔节期、花后10 d和成熟期存在不同程度差异(表2),其余生育时期各处理间无

显著差异。拔节期,仅C4500处理的群体地上部干物质积累量显著低于CK;花后10 d,CCC和MP各处理群体地上部干物质积累量均高于CK,其中C4500、C6750和MP525处理分别较CK显著提高37.49%、52.27%和47.16%;成熟期MP各处理的群体地上部干物质积累量较CCC各处理平均提高10.29%,说明MP对小麦干物质积累的促进效果更好。显著性检验结果表明,花后10 d和成熟期两种延缓剂浓度对小麦群体地上部干物质积累量的影响分别达极显著和显著水平,延缓剂种类与浓度间的交互作用对花后10 d的群体地上部干物质积累量影响极显著,延缓剂种类对各时期小麦群体的干物质积累量影响均不显著。

对小麦单株地上部干物质积累的动态变化拟合结果表明(表3),CCC与MP处理的单株干物质积累量快速增长期分别始于起身后35.8~39.7 d和37.7~39.5 d,均略晚于CK,干物质最大相对生长速率( $V_m$ )分别出现在起身后52.7~57.9 d和54.8~58.5 d,其中MP各处理的 $V_m$ 略低于CK,而 $\Delta t$ 略高于CK。对比群体与个体的干物质积累特征发现,C4500和MP225处理对群体干物质积累有促进作用,但两者单株干物质积累特点不同,其中C4500处理以较高的 $V_m$ 弥补了 $\Delta t$ 的不足,MP225处理则通过较长的 $\Delta t$ 弥补了 $V_m$ 降低的影响。

表1 植物生长延缓剂对不同生育时期小麦群体茎蘖数的影响

Table 1 Effects of plant growth retardants on the number of stem and tillers of wheat at different growth stages

处理 Treatment	起身期 Raising stage /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	拔节期 Jointing stage /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	抽穗期 Heading stage /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	开花期 Flowering stage /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	成熟期 Maturity stage /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	成穗率 Percentage of ear bearing tiller/%
CK	1207.83±221.55a	1049.75±145.27ab	743.43±25.69ab	712.12±83.25a	624.24±10.93abc	49.45±5.38a
C4500	1234.34±234.19a	878.79±95.45c	704.55±36.08b	701.01±60.71a	629.29±32.68ab	52.27±10.34a
C5250	1252.02±99.77a	894.44±73.25bc	771.21±30.27a	739.39±27.77a	635.35±32.68ab	51.02±5.66a
C6750	1215.66±279.86a	916.16±153.09bc	730.81±26.52ab	727.27±63.85a	642.42±22.88ab	54.84±12.98a
C9000	1225.25±324.84a	921.21±37.02bc	730.30±21.21ab	670.71±57.60a	573.74±20.18c	48.99±12.26a
MP225	1296.97±117.67a	1056.06±34.15abc	750.51±56.39ab	709.09±45.76a	638.38±43.32ab	49.57±6.49a
MP375	1288.89±289.09a	1013.64±129.92abc	760.61±58.05ab	755.56±82.73a	605.05±37.40bc	48.65±12.27a
MP525	1271.72±120.13a	1148.99±25.23a	790.40±43.18a	725.25±82.73a	661.62±38.13a	52.16±2.60a
F 值 F value						
延缓剂种类 Type	0.282	7.944 *	6.292 *	0.682	1.492	0.154
延缓剂浓度 Concentration	0.104	0.978	0.205	0.480	0.441	0.052
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	0.047	1.553	0.345	0.211	4.656 *	0.298

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ );\*和\*分别表示差异极显著( $P<0.01$ )和差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ). \*\* and \* indicate significant difference at  $P<0.01$  and  $P<0.05$  level, respectively. The same below.

表 2 植物生长延缓剂对不同生育时期小麦群体地上部干物质积累量的影响/(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Effects of plant growth retardants on above-ground dry matter accumulation of wheat population at different growth stages

处理 Treatment	起身期 Raising stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	花后 10 d 10 days after flowering	成熟期 Maturity stage
CK	2248.67±324.18a	4443.28±833.88a	16211.09±2068.52ab	18757.34±2426.55a	21479.12±2529.16d	36142.63±2118.63abc
C4500	2406.61±170.58a	3347.71±569.12b	14884.14±1174.83b	19532.05±3285.58a	29532.05±3398.03ab	40201.52±3318.59a
C5250	2574.35±142.07a	3533.01±432.52ab	15611.99±1047.35ab	20380.13±2200.25a	22208.75±1654.54cd	32398.08±6024.57bc
C6750	2448.61±59.90a	3608.23±842.46ab	16673.99±132.49ab	17565.19±1992.18a	32707.14±2947.53a	37141.65±4150.62ab
C9000	2487.53±592.08a	3865.30±652.79ab	14627.07±1171.24b	18273.94±2743.78a	25848.35±1584.92bc	30502.53±1129.11c
MP225	2185.66±232.56a	4338.56±603.89ab	16705.49±1370.01ab	19247.54±1271.07a	22600.13±2136.20cd	39900.47±2476.66a
MP375	2183.23±58.82a	4147.92±930.74ab	16647.37±1433.73ab	19674.75±2466.31a	26306.53±3002.14bc	38914.51±1632.42a
MP525	2299.78±152.69a	4064.70±679.00ab	17824.02±593.43a	17448.55±3541.89a	31609.23±2115.25a	37186.03±5177.66ab
F 值 F value						
延缓剂种类 Type	2.094	2.258	3.635	0.067	3.435	2.064
延缓剂浓度 Concentration	0.470	1.118	0.201	0.602	12.017**	3.194*
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	0.363	0.629	1.404	0.392	8.618**	1.294

表 3 植物生长延缓剂对小麦单株地上部干物质积累速率的影响

Table 3 Effects of plant growth retardants on the rate of above-ground dry matter accumulation per plant of wheat

处理 Treatment	Logistic 方程 Logistic equation	理论最大单株干物质积累量 Theoretical maximum dry matter accumulation per plant/(g·plant <sup>-1</sup> )		R <sup>2</sup>	V <sub>m</sub> /(g·plant <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	持续时间 Duration/d			
						t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>m</sub>	Δt
CK	$Y = 1.040 / (1 + 63.498e^{-8.46t})$	4.66	0.985	0.220	35.2	67.9	51.5	32.7	
C4500	$Y = 1.031 / (1 + 83.907e^{-8.669t})$	4.81	0.994	0.223	37.7	69.6	53.7	31.9	
C5250	$Y = 1.056 / (1 + 31.354e^{-6.246t})$	5.09	0.997	0.165	35.8	80.1	57.9	44.3	
C6750	$Y = 1.048 / (1 + 73.812e^{-8.569t})$	4.72	0.971	0.225	36.6	68.8	52.7	32.3	
C9000	$Y = 1.034 / (1 + 94.622e^{-8.559t})$	5.11	0.993	0.220	39.7	72.0	55.8	32.3	
MP225	$Y = 1.052 / (1 + 45.222e^{-6.846t})$	5.66	0.998	0.180	38.3	78.7	58.5	40.4	
MP375	$Y = 1.046 / (1 + 59.781e^{-7.364t})$	5.61	0.995	0.190	39.5	77.1	58.3	37.6	
MP525	$Y = 1.042 / (1 + 68.044e^{-8.092t})$	5.07	0.976	0.210	37.7	71.8	54.8	34.2	

注: V<sub>m</sub> 为干物质最大相对生长速率; Δt 为干物质积累持续天数; t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>、t<sub>m</sub> 分别为干物质积累快速增长长期的起始时间、结束时间以及达到干物质最大相对生长速率的时间; R<sup>2</sup> 为决定系数。由于原始值较大导致迭代运算次数过多, 故将原始数据均除以最后一次实测值进行标准化, 所得 k 乘以最后一次实测值即为理论最大值。

Note: V<sub>m</sub> is the maximum accumulation rate of dry matter; Δt is the duration of dry matter accumulation; t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, and t<sub>m</sub> is the starting and ending time of the rapid growth period of dry matter accumulation, as well as the time to reach the maximum rate of dry matter accumulation; R<sup>2</sup> is the determination coefficient. Due to the large value, there are too many iterations of calculation. Therefore, the data is divided by the last measured value for standardization. The theoretical maximum value is obtained by multiplying k by the last measured value.

2.1.3 叶面积指数 由图 2 可知, 随生育进程推进各处理小麦群体叶面积指数均先升高后降低, 在孕穗期达到最大值。起身期, 各处理间群体叶面积指数差异均不显著; 拔节期, CCC 各处理的群体叶面积指数均显著小于 CK, 而 MP 各处理与 CK 差异不显著。孕穗期, MP 各处理叶面积指数介于 6.99~9.63, 均值为 8.56; CCC 各处理叶面积指数介于 7.16~8.84, 均值为 7.90, 与 CK 差异不显著。抽穗期, 各处理叶面积指数开始下降, CCC 各处理与 CK 差异不显著, MP375 处理的叶面积指数显著低于 CK 及 MP225、MP525 处理。开花期 MP 各处理叶面积指

数介于 6.13~6.62, 均值为 6.32; CCC 各处理叶面积指数介于 6.32~7.44, 均值为 6.75, 仅 C4500 显著高于 CK。

开花期到花后 30 d, 各处理的叶面积指数快速下降, CCC 和 MP 各处理的叶面积指数平均降幅分别为 33.63% 和 33.94%, 其中 C4500 和 MP525 处理的叶面积指数降幅较小, 分别为 30.32% 和 24.43%, 确保生育中后期小麦群体仍有较高的叶面积指数。花后 30 d, CCC 处理的叶面积指数表现为 C4500>C5250>C6750>C9000, MP 处理的叶面积指数表现为 MP525>MP225>MP375, 其中 C4500 与 MP525 的叶面

积指数分别较 CK 提高 24.84%和 13.34%。

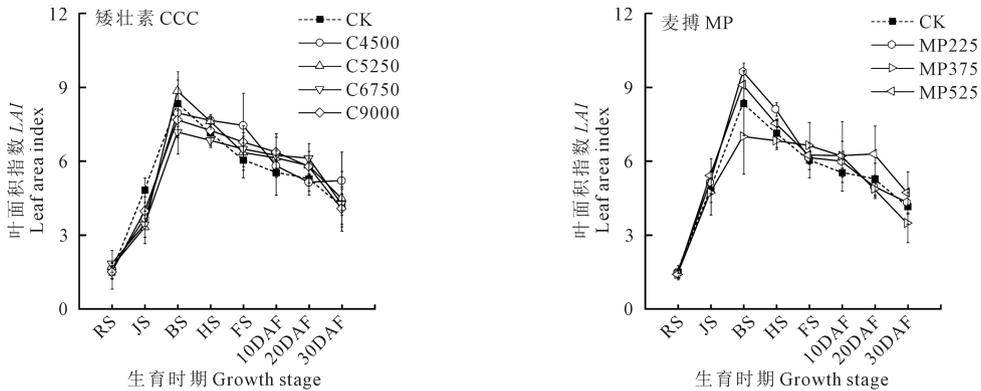
2.1.4 粒数叶比和粒重叶比 由图 3 可知,CCC 各处理的粒数叶比与粒重叶比均随 CCC 浓度的增大而升高,其中 C9000 处理的粒数叶比和粒重叶比分别较 CK 提高 15.95%和 27.72% ( $P<0.05$ )。MP 各处理的粒数叶比和粒重叶比则均随 MP 喷施浓度的增大而先升高后降低,其中 MP375 处理的粒数叶比和粒重叶比最大,分别为  $0.54 \text{ 粒} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和  $29.68 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,较 CK 分别提高显著 32.93%和 48.12% ( $P<0.05$ )。

## 2.2 植物生长延缓剂对滴灌冬小麦茎秆性状的影响

2.2.1 株高 各处理小麦株高在抽穗前快速增长,开花期以后趋于稳定(表 4)。起身期,各处理间株高无显著差异;拔节期,CCC 和 MP 各处理的株高分

别较 CK 显著降低 7.59%~14.23%和 16.66%~25.54%,MP 处理降幅高于 CCC 处理,即 MP 较 CCC 对拔节期小麦株高的控制效果更好。拔节期~抽穗期是小麦株高快速增长时期,抽穗期,CCC 各处理株高显著低于 CK;除 MP375 处理的株高显著低于 CK,其余各 MP 处理株高与 CK 差异不显著。开花期、花后 10 d 及成熟期,高浓度 CCC 处理(C6750 与 C9000)与高浓度 MP 处理(MP375 与 MP525)的株高均显著低于 CK。

由表 4 可知,除起身期外,延缓剂浓度对其余各生育时期的小麦株高均有极显著影响;拔节期和抽穗期,延缓剂种类对株高的影响分别达极显著和显著水平;延缓剂种类与浓度的交互作用在拔节期对小麦株高的影响极显著,在其余时期对株高影响不显著。

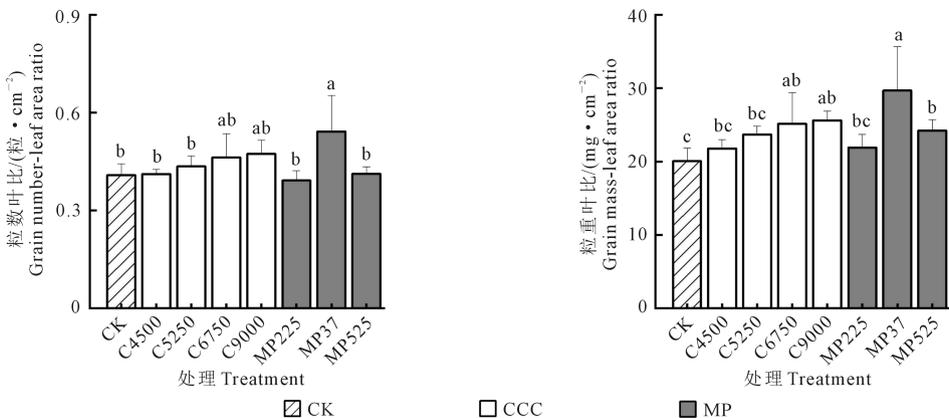


注:RS、JS、BS、HS、FS、10DAF、20DAF 和 30DAF 分别代表起身期、拔节期、孕穗期、抽穗期、开花期、花后 10 d、花后 20 d 和花后 30 d。

Note: RS, JS, BS, HS, FS, 10DAF, 20DAF, and 30DAF represent the raising stage, jointing stage, booting stage, heading stage, flowering stage, 10 days after flowering, 20 days after flowering, and 30 days after flowering, respectively.

图 2 植物生长延缓剂对小麦不同生育时期叶面积指数影响

Fig.2 Effects of plant growth retardants on leaf area index of wheat at different growth stages



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图 3 植物生长延缓剂对小麦群体粒叶比和粒重叶比的影响

Fig.3 Effects of plant growth retardants on grain number-leaf area ratio and grain mass-leaf area ratio of wheat

表 4 植物生长延缓剂对不同生育时期小麦群体株高的影响/cm

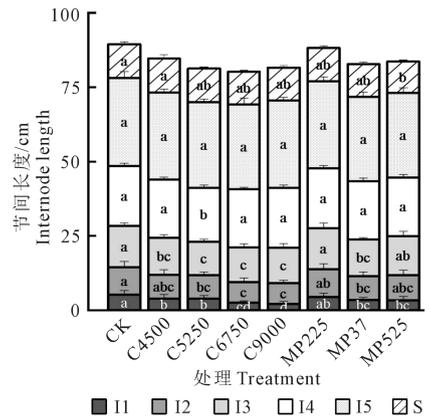
Table 4 Effects of plant growth retardants on plant height of wheat at different growth stages

处理 Treatment	起身期 Raising stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	花后 10 d 10 days after flowering	成熟期 Maturity stage
CK	14.92±0.96a	34.48±1.30a	73.75±6.71a	83.64±5.82a	88.85±5.64a	89.63±4.70a
C4500	15.20±0.71a	29.83±1.43cd	67.84±4.28c	78.69±4.95ab	85.66±2.98ab	84.93±4.79bc
C5250	15.45±0.72a	31.87±1.57b	64.52±6.45c	79.87±5.60ab	85.50±2.65ab	81.48±2.53c
C6750	15.83±0.97a	30.77±2.43bc	68.34±5.62bc	75.36±7.14b	84.29±4.69bc	81.07±5.30c
C9000	15.05±0.64a	29.58±1.06cd	67.40±3.90c	76.90±6.96b	84.32±4.97bc	82.69±1.63c
MP225	14.40±0.70a	25.68±2.12e	73.01±3.12ab	79.70±5.66ab	86.18±4.47ab	87.96±5.22ab
MP375	15.67±2.11a	28.52±0.65d	68.61±4.99bc	77.36±6.51b	81.11±2.02c	83.38±3.70c
MP525	14.55±1.66a	28.73±1.08d	74.83±4.65a	77.80±7.80b	85.18±3.70b	84.31±4.17bc
F 值 F value						
延缓剂种类 Type	0.745	30.019 **	6.760 *	0.509	0.199	3.294
延缓剂浓度 Concentration	0.821	81.077 **	4.648 **	5.529 **	6.207 **	12.640 **
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	0.201	8.503 **	2.330	0.108	0.750	0.590

2.2.2 节间长、基部节间占比及重心高度 喷施 CCC 与 MP 整体上降低了小麦株高(图 4),除第五节间(I5)外,其余各节间长及穗长均受到了 CCC 与 MP 浓度不同程度的影响,其中 MP525 处理的穗长较 CK 显著降低 6.75%;C6750 与 C9000 处理的小麦第一(I1)、第二(I2)、第三(I3)节间长度均较 CK 有所降低,C6750 处理分别降低 51.72%、25.97% 和 15.00%,C9000 处理分别降低 58.80%、25.01% 和 14.51%,差异均达显著水平。由表 5 可知,C6750 和 C9000 处理的小麦基部节间长度与节间总长度比值分别为 12.89% 和 12.93%,显著低于其他处理,分别较 CK 降低 30.40% 和 30.18%。表明延缓剂对节间长度的抑制效果从 I1 到 I5 依次递减。显著性检验结果表明,延缓剂种类及浓度均对基部节间长度占各节间总长度之比的影响达极显著水平,两因素互作影响不显著。

各处理的小麦茎秆重心高度均随生育时期推进逐渐升高(图 5),在花后 20 d 达到最大值。开花期,C9000 和 MP525 处理茎秆重心高度较 CK 分别显著降低 7.85% 和 6.80%,其余处理均与 CK 差异不显著。花后 10 d,CCC 各处理的茎秆重心高度介于 50.32~51.59 cm,MP 各处理的茎秆重心高度介于 48.24~50.82 cm,各处理均较 CK 有所降低,MP375 处理显著降低。花后 20 d,除 MP225 和 C4500 处理外,其余处理均较 CK 显著降低。

2.2.3 节间茎秆粗度、壁厚及茎秆充实度 如表 6 所示,花后 20 d,小麦茎秆各节间平均粗度表现为 I4>I3>I5>I2>I1,平均茎壁厚表现为 I1>I3>I5>I2>I4,平均茎秆充实度表现为 I1>I2>I3>I4>I5。各处理的 I1 茎粗与 CK 差异均不显著;MP525 处理的 I2 茎粗较 CK 显著提高 6.87%;C4500、C9000 和 MP225 处理的 I3 茎粗较 CK 显著提高 9.45%~17.06%;各处



注: I1、I2、I3、I4、I5 和 S 分别代表从基部向上的第一节间、第二节间、第三节间、第四节间、第五节间和穗。

Note: I1, I2, I3, I4, I5, and S represent the first internode, second internode, third internode, fourth internode, fifth internode, and spike from the base upwards, respectively.

图 4 植物生长延缓剂对花后 20 d 小麦穗长及各节间长度影响  
Fig.4 Effects of plant growth retardants on the spike length and internode length of wheat at 20 days after flowering

表 5 植物生长延缓剂对花后 20 d 小麦群体基部节间占比的影响

Table 5 Effect of plant growth retardants on the ratio of basal internodes of wheat at 20 days after flowering

处理 Treatment	基部节间占比/% Ratio of basal internodes
CK	18.52±3.23a
C4500	16.25±3.20b
C5250	16.77±2.14ab
C6750	12.89±1.93c
C9000	12.93±1.95c
MP225	17.73±2.76ab
MP375	15.96±2.50b
MP525	15.95±3.13b
F 值 F value	
延缓剂种类 Type	9.168 **
延缓剂浓度 Concentration	9.770 **
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	1.733

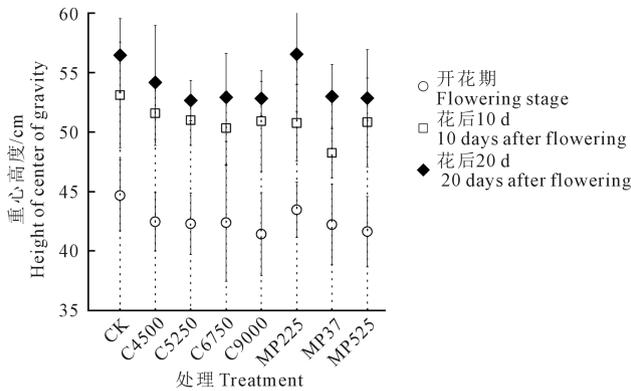


图5 植物生长延缓剂对小麦茎秆重心高度的影响

Fig.5 Effects of plant growth retardants on the height of center of gravity of wheat stem

理的 I4 茎粗均显著高于 CK;除 MP525 处理外,其余处理的 I5 茎粗均显著高于 CK。

CCC、MP 各处理均不同程度提高了 I1~I5 节间的茎壁厚度,其中 C6750 和 MP525 处理对 I1、I2 茎壁厚度提高幅度最大,C6750 处理的 I1、I2 茎壁厚度分别较 CK 显著提高 19.40%、28.00%,MP525 处理分别较 CK 显著提高 18.89%、33.54%。C6750、C9000 和 MP525 处理均能显著提高 I1 的茎秆充实度,较 CK 增幅分别为 165.77%、119.69%和 99.26%。显著性检验结果表明,延缓剂种类对 I1 和 I3 的茎秆充实度影响达显著水平,延缓剂浓度对 I1~I5 节间的茎壁厚度影响达极显著水平,其中 I1 和 I2 的茎秆充实度受延缓剂种类与浓度的交互作用影响显著。

**2.2.4 节间茎秆抗折力** 如图 6 所示,开花期,MP375 处理的 I2、I3 茎秆抗折力分别较 CK 提高 15.54% ( $P < 0.05$ ) 和 13.23%;花后 10 d,C6750 与 MP525 处理的 I2 抗折力分别较 CK 提高 24.36% ( $P < 0.05$ ) 和 14.01%,其余各处理均与 CK 差异不显著;花后 20 d,C5250 处理的 I2、I3 抗折力分别较 CK 显著提高 50.19% 和 22.09%,MP525 处理分别较 CK 显著提高 42.70% 和 26.70%;多数处理的 I4、I5 抗折力在三个生育时期与 CK 差异不显著。总体而言,两种延缓剂主要增强了 I2、I3 的抗折力,对 I4、I5 调控效果不明显,高浓度延缓剂对生育后期茎秆抗折力的调节能力逐渐增强。

**2.2.5 茎秆倒伏指数** 从开花期到花后 10 d,小麦茎秆倒伏指数均值不断升高(表 7)。开花期和花后 10 d,小麦茎秆倒伏指数受 CCC 与 MP 浓度的影响不大,仅 C6750 处理在开花期较 CK 显著降低 22.93% 和 33.03%;CCC 各处理平均小麦茎秆倒伏

指数分别为 27.65 和 60.27,MP 各处理平均值分别为 27.16 和 58.21,两个时期两种延缓剂类型间差异均不显著。花后 20 d,各 CCC 处理的小麦茎秆倒伏指数均较 CK 显著降低但差异不显著;MP 各处理的小麦茎秆倒伏指数随 MP 浓度增大呈先升高后降低趋势,MP525 处理较 CK 降低 41.27%,差异不显著;CCC 各处理倒伏指数平均值为 55.89,MP 各处理平均值为 75.67,两种延缓剂类型间差异极显著。显著性检验结果表明,延缓剂种类对花后 20 d 茎秆倒伏指数的影响达显著水平,延缓剂浓度对花后各时期的茎秆倒伏指数的影响达显著或极显著水平,两因素交互极显著影响花后 20 d 的茎秆倒伏指数。

### 2.3 植物生长延缓剂对滴灌冬小麦的产量及其构成因素的影响

由表 8 可知,CCC 与 MP 各处理的小麦有效穗数与穗粒数均与 CK 间无显著差异。CCC 各处理的小麦千粒重介于 52.87~54.54 g,均值为 54.00 g,MP 各处理的千粒重介于 54.75~58.69 g,均值为 56.44 g,两处理组千粒重分别较 CK 显著增加 6.44%~9.80% 和 10.21%~18.15%,MP 处理增幅大于 CCC 处理。显著性检验结果表明,延缓剂种类与浓度的交互作用对小麦有效穗数的影响达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

CCC 各处理的小麦产量均高于 12 000 kg · hm<sup>-2</sup>,较 CK 均有不同程度增加,其中 C5250 处理小麦产量显著高于 CK,达到 13 725.57 kg · hm<sup>-2</sup>,其余 CCC 浓度处理下的小麦产量与 CK 差异不显著。MP 各处理下小麦产量介于 13 328.41~14 380.52 kg · hm<sup>-2</sup>,均较 CK 均显著增加。MP 处理与 CCC 处理的小麦平均产量间差异未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 植物生长延缓剂对滴灌冬小麦产量及高产冬小麦群体特征的影响

高产小麦群体多具有合理的冠层特征,能最大限度吸收利用光合有效辐射并提高光合产物积累量<sup>[16]</sup>。新疆地区丰富的光热资源以及滴灌水肥一体化技术的应用,为小麦产量增加提供了资源与技术保障<sup>[17]</sup>。本研究中,两种植物生长延缓剂处理下,小麦产量介于 12 587.18~14 380.52 kg · hm<sup>-2</sup>,均高于 12 000 kg · hm<sup>-2</sup>,较 CK 显著提高 8.56%~24.03%,其中 MP525 处理产量最高;群体有效穗数介于 573.74~661.62 万株 · hm<sup>-2</sup>,穗粒数介于 43.62~47.53 粒,千粒重介于 52.87~58.69 g,千粒重显著高于 CK,这主要是由于植物生长延缓剂控制节间长

表 6 植物生长延缓剂处理对花后 20 d 小麦茎秆粗度、茎壁厚度和茎秆充实度的影响

Table 6 Effects of plant growth retardants on the diameter of internode, stem wall thickness and stem plumpness at 20 days after flowering

处理 Treatment	茎秆粗度 Stem diameter/mm					茎壁厚度 Wall thickness/mm					茎秆充实度 Stem plumpness/(mg·cm <sup>-1</sup> )				
	I1	I2	I3	I4	I5	I1	I2	I3	I4	I5	I1	I2	I3	I4	I5
CK	3.48±0.45ab	3.96±0.33b	4.23±0.42d	4.31±0.32c	3.89±0.29b	1.10±0.16b	0.90±0.13b	0.96±0.26b	0.86±0.11b	0.97±0.16b	22.76±6.10c	28.85±8.79abc	24.57±9.49b	24.07±6.14a	17.54±3.93b
C4500	3.46±0.30ab	4.17±0.37ab	4.63±0.35abc	4.73±0.34ab	4.20±0.30a	1.25±0.16a	1.11±0.16a	1.23±0.19a	1.04±0.32a	1.12±0.15a	34.66±9.17cd	28.08±4.97abc	30.55±3.22ab	27.99±3.04a	21.07±2.54a
C5250	3.30±0.35b	4.13±0.24ab	4.47±0.13bcd	4.96±0.25a	4.18±0.29a	1.22±0.14a	1.13±0.26a	1.16±0.10a	1.08±0.19a	1.17±0.13a	27.74±3.05de	24.76±7.50bc	25.75±4.01ab	24.68±4.41a	18.06±2.78ab
C6750	3.36±0.37b	3.99±0.21ab	4.47±0.26bcd	4.69±0.15ab	4.17±0.29a	1.32±0.19a	1.16±0.07a	1.14±0.17a	1.07±0.17a	1.12±0.15a	60.48±19.82a	35.25±9.78a	32.98±9.83a	26.65±6.07a	20.23±2.46ab
C9000	3.59±0.42ab	4.10±0.37ab	4.96±0.67a	4.97±0.50a	4.19±0.43a	1.31±0.14a	1.08±0.20a	1.27±0.25a	1.19±0.26a	1.16±0.26a	50.00±19.05ab	26.37±6.22bc	30.32±11.60ab	24.56±4.13a	19.90±3.45ab
MP225	3.64±0.23ab	4.13±0.32ab	4.79±0.30ab	4.68±0.38ab	4.22±0.30a	1.23±0.06a	1.08±0.20a	1.23±0.16a	1.02±0.19ab	1.14±0.22a	30.66±5.38de	31.42±7.24ab	27.53±9.96ab	27.59±10.15a	21.01±6.22a
MP375	3.40±0.27b	4.00±0.22ab	4.31±0.31cd	4.58±0.33b	4.19±0.28a	1.27±0.11a	1.21±0.11a	1.16±0.17a	1.12±0.21a	1.21±0.14a	39.43±12.34bcd	23.27±7.64c	24.17±4.74b	24.25±4.38a	19.54±2.85ab
MP525	3.76±0.42a	4.23±0.17a	4.53±0.26bcd	4.77±0.25ab	3.94±0.24ab	1.31±0.11a	1.21±0.07a	1.10±0.16ab	1.13±0.14a	1.13±0.13a	45.35±12.73bc	27.51±7.35bc	27.28±6.54ab	26.51±5.43a	19.88±3.91ab
F 值 F value															
延缓剂种类 Type	1.355	0.174	1.558	1.631	0.561	0.232	1.124	0.653	0.042	0.273	6.813*	1.018	3.976*	0.027	0.053
延缓剂浓度 Concentration	1.726	2.304	7.730**	12.719**	4.684**	8.755**	14.437**	6.695**	10.307**	6.672**	20.156**	1.026	1.631	1.220	3.315*
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	0.330	0.273	1.948	0.404	0.863	0.149	0.941	0.863	0.268	0.408	2.796*	3.107*	1.086	0.411	0.039

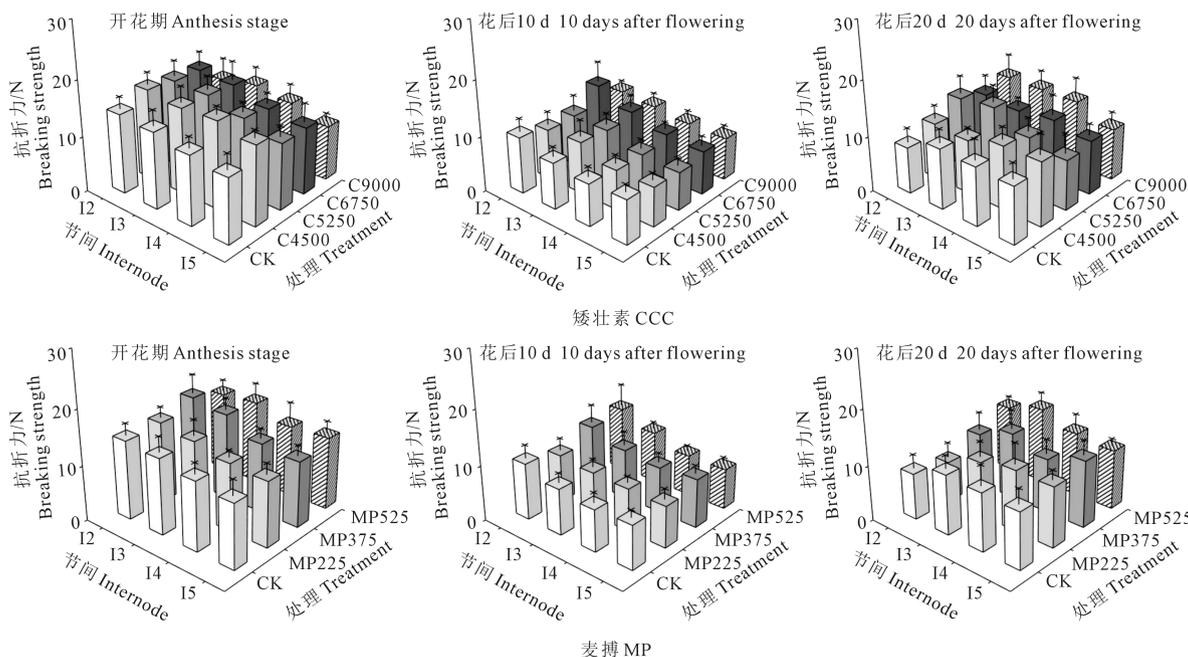


图 6 植物生长延缓剂处理对小麦群体不同生育时期节间抗折力的影响

Fig.6 Effects of plant growth retardants on breaking strength of each internode of wheat at different growth stages

表 7 植物生长延缓剂对小麦群体不同生育时期茎秆倒伏指数的影响

Table 7 Effects of plant growth retardants on stem lodging index of wheat at different growth stages

处理 Treatment	开花期 Flowering stage	花后 10 d 10 days after flowering	花后 20 d 20 days after flowering
CK	29.56±8.34a	56.51±21.02ab	78.02±24.20abc
C4500	29.79±8.16a	69.74±22.80a	60.15±10.16bc
C5250	25.91±4.67ab	70.79±25.01a	55.16±4.24bc
C6750	22.78±6.59b	37.84±5.50b	55.36±21.61bc
C9000	32.10±3.55a	62.69±8.40ab	52.89±16.17bc
MP225	30.01±6.48a	69.08±21.67a	83.61±17.35ab
MP375	24.85±7.91ab	48.70±16.20ab	97.48±22.23a
MP525	26.61±5.15ab	56.84±18.28ab	45.92±10.47c
F 值 F value			
延缓剂种类 Type	0.235	0.059	8.009**
延缓剂浓度 Concentration	2.589*	4.437**	5.136**
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	0.794	0.499	4.505**

表 8 植物生长延缓剂对小麦产量及产量构成因素的影响

Table 8 Effects of plant growth retardants on wheat yield and yield components

处理 Treatment	有效穗数/( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) Spike number	每穗粒数 Grain number per spike	千粒重/g 1000-grain mass	产量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) Yield
CK	624.24±10.93abc	43.98±0.51a	49.67±1.23d	11594.21±443.31c
C4500	629.29±32.68ab	46.17±2.32a	52.87±1.07c	13091.83±1554.46abc
C5250	635.35±32.68ab	46.73±3.57a	54.54±1.79bc	13725.57±368.36ab
C6750	642.42±22.88ab	44.60±1.88a	54.33±0.90bc	13235.73±870.48ab
C9000	573.74±20.18c	47.53±1.54a	54.25±2.59bc	12587.18±1106.72bc
MP225	638.38±43.32ab	46.92±3.93a	55.88±0.42ab	14172.94±286.53a
MP375	605.05±37.40bc	47.33±0.43a	54.75±2.32bc	13328.41±1027.53ab
MP525	661.62±38.13a	43.62±1.12a	58.69±1.62a	14380.52±600.33a
F 值 F value				
延缓剂种类 Type	1.492	0.015	9.051**	4.624*
延缓剂浓度 Concentration	0.441	1.352	15.356**	6.665**
延缓剂种类×浓度 Type×Concentration	4.656*	2.534	2.625	1.535

度,节间长度的减小缩短了源、库间距离,使营养器官的竞争能力减弱,利于光合同化物向穗流动,促进籽粒灌浆<sup>[18-19]</sup>。优化小麦群体是提高小麦产量的关键<sup>[20]</sup>,茎蘖数和茎蘖成穗率是表征群体质量的重要指标<sup>[21]</sup>。本研究中‘新冬 52 号’小麦产量水平下的成穗率介于 48.65%~54.84%,较江苏省‘扬糯麦 1 号’的 8 000  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  高产群体的成穗率(44%~49%)更高<sup>[22]</sup>。研究表明,高产群体还具有较高的花后干物质积累量、适宜的叶面积指数和较高的粒叶比,其中适宜的叶面积指数能促进小麦花后光合产物积累,有利于增加粒重<sup>[23]</sup>。本研究中,高产小麦群体生育期最大叶面积指数介于 8.8~9.6,较山东省‘济麦 44 号’高产( $\geq 9 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )群体的叶面积指数(6.8~7.4)显著提高<sup>[24]</sup>。

### 3.2 植物生长延缓剂对滴灌冬小麦群体特征的影响

新疆高产小麦的花后群体茎蘖数通常在 600 万株·hm<sup>-2</sup>以上,小麦生产中多利用植物生长延缓剂进行控旺<sup>[25]</sup>。本研究发现,CCC 各浓度处理不同程度地降低了小麦拔节期的茎蘖数,且其降低效应优于 MP 处理;同时,C6750、C4500 及 MP525 处理小麦成穗率较 CK 有所提高。可见,喷施矮壮素具有降低拔节期无效分蘖、提高成穗率的效果,而喷施麦搏对早期无效分蘖的抑制作用较小,麦搏处理的群体茎蘖成穗率更高,这与叶德练等<sup>[26]</sup>研究结果相似。

植物生长延缓剂能通过优化群体结构和提高光合生产能力来促进作物干物质积累<sup>[27]</sup>。本研究表明,CCC 和 MP 各处理均可提高花后 10 d 小麦群体地上部干物质积累量,其中 MP 处理较 CCC 处理更有利于成熟期群体的地上部干物质积累。这与适宜浓度 CCC 能促进小麦植株干物质积累增加和提高节间可溶性碳水化合物含量的研究结果一致<sup>[28]</sup>,浓度过高则抑制干物质积累<sup>[29]</sup>。本研究中,C4500 处理提高了干物质最大相对生长速率,MP225 则延长了干物质积累持续天数,两种生长延缓剂通过不同途径增加了高产小麦群体干物质积累,其中喷施麦搏的小麦群体干物质积累能力更强。CCC 与 MP 处理延迟了小麦单株干物质积累快速增长起始期,这可能与植物生长延缓剂抑制作物花前光合作用而促进花后灌浆光合作用有关<sup>[30]</sup>。

本研究发现,CCC 处理降低了拔节期小麦群体的叶面积指数,C4500 与 MP525 处理降低了开花期~花后 30 d 叶面积指数的下降幅度,以确保生育中后期小麦群体较高的叶面积指数,这与 Banerjee 等<sup>[31]</sup>矮壮素能显著增加生育后期叶面积持续时间的研究结果一致。赵黎明等<sup>[32]</sup>和李永松等<sup>[33]</sup>研究表明,植物生长调节剂均能促使作物粒叶比增加,改善群体源、库关系。本研究也发现,随延缓剂浓度的提高,CCC 处理的小麦粒数叶比与粒重叶比逐渐升高,MP 处理则先升高后降低,其中 C9000、MP375 和 MP525 处理粒重叶比均较 CK 显著提高,对于改善群体源、库具有重要意义。

### 3.3 植物生长延缓剂对滴灌冬小麦抗倒伏性状的影响

倒伏是影响小麦高产的主要因素之一,合理施用植物生长延缓剂可有效控制小麦倒伏<sup>[34]</sup>。研究

表明,矮壮素、甲哌鎊等植物生长延缓剂通过抑制犍牛儿基二磷酸转变为贝壳杉烯而抑制赤霉素生物合成,调控小麦茎秆生长,降低倒伏率<sup>[35-36]</sup>。王志鑫<sup>[37]</sup>研究表明,喷施矮壮素能显著降低小麦灌浆期株高、植株重心高度及基部第二节间长度,增加茎秆抗折力及抗倒指数。本研究发现,喷施 CCC 和 MP 均能提高冬小麦抗倒性,且 C9000 和 MP525 处理效果最佳,这与何兰兰等<sup>[38]</sup>研究结果相似。

本研究发现,喷施 MP 对滴灌冬小麦重心高度的降低作用及其壁厚的促进效果均优于 CCC,对其余抗倒伏性状的调控效应则不及 CCC,这与陈志等<sup>[39]</sup>研究发现的 5%调环酸钙和 25%甲哌鎊配施在降低春小麦株高和增加茎粗的效果方面优于 CCC 的结果不完全相同,具体原因仍需进一步探究。

## 4 结 论

叶面喷施矮壮素与麦搏能降低冬小麦株高与植株重心高度,增大茎粗、基部节间占比,提高茎秆充实度与茎秆抗折力,降低茎秆倒伏指数,其中 9 000 mL·hm<sup>-2</sup>浓度矮壮素和 525 g·hm<sup>-2</sup>浓度麦搏处理效果最优,且矮壮素在改善茎秆形态方面作用优于麦搏。两种植物生长延缓剂处理下,小麦茎蘖成穗率介于 48.65%~54.84%,成熟期群体干物质积累量介于 30 502.53~40 201.52 kg·hm<sup>-2</sup>,单株干物质积累快速增长期持续天数为 31.9~44.3 d,粒数叶比及粒重叶比平均分别为 0.45 粒·cm<sup>-2</sup>和 24.57 mg·cm<sup>-2</sup>,平均有效穗数、每穗粒数及千粒重分别为 626.55 万株·hm<sup>-2</sup>、46.13 粒和 55.04 g,矮壮素 5 250 mL·hm<sup>-2</sup>、麦搏 225 g·hm<sup>-2</sup>和麦搏 525 g·hm<sup>-2</sup>喷施处理的籽粒产量最高,分别为 13 725.57、14 172.94 kg·hm<sup>-2</sup>和 14 380.52 kg·hm<sup>-2</sup>,较未喷施延缓剂处理显著提高 18.38%~24.03%。5 250 mL·hm<sup>-2</sup>矮壮素和 525 g·hm<sup>-2</sup>麦搏在优化小麦株型结构和改善群体源库关系方面效果最佳。

### 参 考 文 献:

- [1] 刘正佳,钟会民,李裕瑞,等.近 20 年中国粮食生产变化特征及其对区域粮食供需格局的影响[J].自然资源学报,2021,36(6):1413-1425.  
LIU Z J, ZHONG H M, LI Y R, et al. Change in grain production in China and its impacts on spatial supply and demand distributions in recent two decades[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1413-1425.
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.  
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M].

- Beijing; China Statistics Press, 2023.
- [3] 马呈忠. 探寻新疆粮食丰产密码[N]. 经济日报, 2024-01-14.  
MA C Z. Exploring the password for high grain production in Xinjiang [N]. Economic Daily, 2024-01-14.
- [4] 郑娅莉. 连续三年刷新新疆冬小麦高产纪录, 这个农场为什么这么“能”? [N]. 兵团日报, 2023-08-17.  
ZHENG Y L. Why do winter wheat record high yield? [N]. Corps Daily, 2023-08-17.
- [5] 张园, 郭国安, 田文仲, 等. 黄淮区旱作条件下高产冬小麦品种筛选及高产指标研究[J]. 江西农业学报, 2017, 29(6): 7-12.  
ZHANG Y, GUO G A, TIAN W Z, et al. Studies on screening and high-yielding indexes of high-yielding winter wheat varieties under dry farming condition in Huanghuai area [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(6): 7-12.
- [6] ALI S, XU Y Y, JIA Q M, et al. Cultivation techniques combined with deficit irrigation improves winter wheat photosynthetic characteristics, dry matter translocation and water use efficiency under simulated rainfall conditions [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 207-218.
- [7] 王昌秀. 微喷带灌溉条件下施氮量对小麦光合特性和氮素利用特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.  
WANG C X. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and nitrogen utilization of wheat with micro-sprinkling irrigation [D]. Tyan; Shandong Agricultural University, 2018.
- [8] KHOBRA R, SAREEN S, MEENA B K, et al. Exploring the traits for lodging tolerance in wheat genotypes: a review[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2019, 25(3): 589-600.
- [9] 陆佩玲, 陈京都, 唐建鹏, 等. 植物生长调节剂在小麦上的应用研究进展[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(1): 1-7.  
LU P L, CHEN J D, TANG J P, et al. Research progress on the application of plant growth regulators in wheat production [J]. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(1): 1-7.
- [10] 马瑞琦, 亓振, 常旭虹, 等. 化控剂对冬小麦植株性状及产量品质的调节效应[J]. 作物杂志, 2018, (1): 133-140.  
MA R Q, QI Z, CHANG X H, et al. Regulation effects of growth regulators on plant characters, yield and quality of winter wheat [J]. Crops, 2018, (1): 133-140.
- [11] 石文军, 孙妍, 刘强, 等. 抗倒剂对小麦抗倒伏能力、长势及产量的影响[J]. 农业科技通讯, 2021, (9): 108-110.  
SHI W J, SUN Y, LIU Q, et al. Effects of lodging resistance agents on lodging resistance, growth and yield of wheat [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2021, (9): 108-110.
- [12] 孙斌, 张佳佳, 宋语娇, 等. 5%调环酸钙 EA 对小麦抗倒伏和产量及其相关因素的影响[J]. 农学报, 2022, 12(6): 14-17.  
SUN B, ZHANG J J, SONG Y J, et al. 5% prohexadione calcium EA: effects on lodging resistance, yield and its related factors of wheat [J]. Journal of Agriculture, 2022, 12(6): 14-17.
- [13] 康靛, 张娜, 张永强, 等. 矮壮素滴施量对滴灌冬小麦茎秆特征及其抗倒伏性的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(1): 63-69.  
KANG L, ZHANG N, ZHANG Y Q, et al. Effects of CCC irrigation amount on stem characteristics and lodging resistance of winter wheat under drip irrigation [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(1): 63-69.
- [14] 张景灿, 张永强, 雷钧杰, 等. 不同调节剂对滴灌冬小麦茎秆特征及其抗倒伏性的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(5): 1067-1074.  
ZHANG J C, ZHANG Y Q, LEI J J, et al. Effects of different growth regulators on stem characteristics and lodging resistance of winter wheat under drip irrigation [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(5): 1067-1074.
- [15] 蔡春雷, 孟越, 陈志. 麦搏在巴里坤县春小麦上的应用效果试验[J]. 新疆农业科技, 2023, (4): 32-34.  
CAI C L, MENG Y, CHEN Z. Experiment on the application effect of Maibo on spring wheat in Balikun [J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2023, (4): 32-34.
- [16] LONG S P, ZHU X G, NAIDU S L, et al. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? [J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(3): 315-330.
- [17] 马富裕, 刘扬, 崔静, 等. 水肥一体化研究进展[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(1): 183-192.  
MA F Y, LIU Y, CUI J, et al. Review on the research progress of water and fertilizer integration [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(1): 183-192.
- [18] ZHAO Y T, ZHANG S, LV Y J, et al. Optimizing ear-plant height ratio to improve kernel number and lodging resistance in maize (*Zea mays* L.) [J]. Field Crops Research, 2022, 276: 108376.
- [19] REN J H, JIANG Y H, HAN W W, et al. Simultaneous enhancement of maize yield and lodging resistance via delaying plant growth retardant application [J]. Field Crops Research, 2024, 317: 109530.
- [20] WANG X F, ZHANG J W, WANG X Q, et al. Non-uniform wheat population distribution enhances wheat yield and lodging resistance synchronously [J]. European Journal of Agronomy, 2024, 152: 127033.
- [21] 侯慧芝, 张绪成, 尹嘉德, 等. 全膜微垄沟穴播对春小麦土壤水热环境的影响及其光合和产量效应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3005-3014.  
HOU H Z, ZHANG X C, YIN J D, et al. Effects of micro-ridge-furrow with plastic mulching and bunching seeding on soil hydrothermal environment and its response to photosynthesis and grain yield of spring wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3005-3014.
- [22] 管妍, 丁锦峰, 黄正金, 等. 扬糯麦1号 8000 kg·hm<sup>-2</sup>以上高产群体质量指标[J]. 作物学报, 2015, (5): 797-805.  
ZI Y, DING J F, HUANG Z J, et al. Population quality indices for waxy wheat ‘Yangnuomai 1’ with yield higher than 8000 kg·hm<sup>-2</sup> [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, (5): 797-805.
- [23] 冉辉. 灌溉频率与施氮量对滴灌春小麦群体结构和产量的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.  
RAN H. Effect of water frequency and nitrogen interaction on population structure and yield formation of dripping spring wheat [D]. Shi-

- hezi; Shihezi University, 2015.
- [24] 翟冬峰, 余维宝, 崔永升, 等. 山东省强筋小麦产量差及高产群体质量指标[J]. 山东农业科学, 2022, 54(9): 29-35.  
ZHAI D F, YU W B, CUI Y S, et al. Yield gap and high-yield population quality index of strong gluten wheat in Shandong province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(9): 29-35.
- [25] 马金荣, 张鸿雁, 王雅群, 等. 种植密度对不同穗型冬小麦品种结实特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(12): 1607-1615.  
MA J R, ZHANG H Y, WANG Y Q, et al. Effects of planting density on grain setting characteristics and grain yield of winter wheat cultivars with two spike types[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(12): 1607-1615.
- [26] 叶德练, 管大海, 张钰石, 等. 雨养条件下植物生长调节剂对冬小麦根系生长和产量形成的调控研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(2): 125-130.  
YE D L, GUAN D H, ZHANG Y S, et al. Effect of plant growth regulator on the root growth and yield formation of winter wheat under rain-fed condition [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(2): 125-130.
- [27] 马金龙. 三种植物生长调节剂对藜麦生长及产量形成的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.  
MA J L. Effects of three plant growth regulators on growth and yield formation of quinoa [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.
- [28] LI H M, CUI G G, LI G Y, et al. Assessing the efficacy and residual impact of plant growth retardants on crop lodging and overgrowth; a review[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 159: 127276.
- [29] ESPINDULA M, ROCHA V, GROSSI J, et al. Use of growth retardants in wheat *Utilização de Redutores de Crescimento em Trigo* [J]. Planta Daninha, 2009, 27(2): 379-387.
- [30] 张飞, 王艳秋, 朱凯, 等. 矮壮素施用对甜高粱品种抗倒及光合物质生产的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 1972-1976.  
ZHANG F, WANG Y Q, ZHU K, et al. Effect of chlormequat chloride application on lodging character, photosynthetic and material production of sweet sorghum[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 1972-1976.
- [31] BANERJEE A, DATTA J K, MONDAL N K. Changes in morpho-physiological traits of mustard under the influence of different fertilizers and plant growth regulator cycocel[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2012, 11(2): 89-97.
- [32] 赵黎明, 王亚新, 蒋文鑫, 等. 植物生长调节剂对优质粳稻产量、品质与光合特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(5): 1003-1014.  
ZHAO L M, WANG Y X, JIANG W X, et al. Effects of plant growth regulators on yield, quality and photosynthetic characteristics of high-quality japonica rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(5): 1003-1014.
- [33] 李永松, 陈基旺, 袁帅, 等. 3种化学调控剂对湘南双季超级稻源库关系的影响[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 93-100.  
LI Y S, CHEN J W, YUAN S, et al. Effects of three chemical regulators on source-sink relationship of double-cropping super rice in southern Hunan[J]. Hybrid Rice, 2021, 36(1): 93-100.
- [34] YANG L, LIU J, LI N, et al. An integrated strategy coordinating endogenous and exogenous approaches to alleviate crop lodging [J]. Plant Stress, 2023, 9: 100197.
- [35] MENG L, YU K K, WEI Z X, et al. High dosage of mepiquat chloride delays defoliation of harvest aids in cotton[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 202: 116998.
- [36] VAZAYEFI M, SHEKARI F, ZANGANI E, et al. Seed treatment with chlormequat chloride improves the physiological and biochemical characteristics of *Brassica napus* L. under salt stress[J]. Plant Stress, 2023, 9: 100175.
- [37] 王志鑫. 春季追氮和矮壮素对冬小麦抗倒的影响及增产机理研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.  
WANG Z X. Effects of nitrogen topdressing in spring and cycocel on lodging resistance of winter wheat and study on yield-increasing mechanism[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022.
- [38] 何兰兰, 刘桂云, 荆江涛. 不同化控时期、化控剂量对小麦化控效果试验研究[J]. 农业科技通讯, 2020, (9): 111-114.  
HE L L, LIU G Y, JING J T. Experimental study on chemical control effect of wheat with different chemical control period and chemical control dose [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2020, (9): 111-114.
- [39] 陈志, 王山虎, 阿布都艾尼, 等. 5%调环酸钙用于春小麦调控技术试验报告[J]. 农业开发与装备, 2022, (12): 188-189.  
CHEN Z, WANG S H, A B D A N, et al. Experimental report on the use of 5% calcium cyclamate in spring wheat regulation technology [J]. Agricultural Development and Equipments, 2022, (12): 188-189.