



蒋娟, 王文中, 胡铁柱, 张越美, 刘文学, 巩志忠, 齐俊生. 维大力对小麦出苗及生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(4): 28-37.
JIANG Juan, WANG Wenzhong, HU Tiezhu, ZHANG Yue Mei, LIU Wenxue, GONG Zhizhong, QI Junsheng. Effects of VDAL on the emergence and growth of wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(4): 28-37.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.04.03

维大力对小麦出苗及生长的影响

蒋娟¹ 王文中² 胡铁柱³ 张越美¹ 刘文学⁴ 巩志忠^{1*} 齐俊生^{4*}

(1. 中国农业大学生物学院, 北京 100083;

2. 汶上县科技人才合作交流中心, 山东 济宁 272500;

3. 河南科技学院农学院, 河南 新乡 453003;

4. 山东金藤甘薯研究院, 山东 济宁 272504)

摘要 为探究维大力(VDAL)对冬小麦出苗、苗期生长及产量的影响,以冬小麦‘百农4199’为试验材料,室内盆栽试验中,设置添加0.2%(质量百分比, V_1)、0.4%(V_2)及0.8%(V_3)维大力的福·戊种衣剂包衣和不添加维大力的种衣剂包衣(CK_1)及不包衣(CK)的种子处理,测定小麦出苗率、苗期株高、根长及根冠比;大田试验中,设置添加0.8%维大力的种衣剂包衣(V_c)、抽穗期用浓度为66.7 mg/L的维大力叶面喷施(V_f)及2种方式相结合(V_c+V_f)的处理,以不添加维大力的种衣剂包衣(CK_1)和常规丰产不包衣(CK)作为对照,测定小麦出苗率、苗期分蘖数、根系活力、收获期产量及产量构成因素等指标。结果表明:室内盆栽试验中,在播种后第35天时, V_3 的小麦株高比CK及 CK_1 分别高出7.78%和18.56%($P<0.05$)。田间试验中, V_c+V_f 相较于 CK_1 ,公顷穗数、穗粒数和千粒重分别增加12.20%、7.20%和1.57%,理论产量提升17.10%;与CK相比,分别增长7.86%、11.10%和1.86%,理论产量增长17.27%。综合分析表明,维大力种衣剂包衣处理及叶面喷施对小麦苗期株高、产量及产量构成均有促进作用,且两者结合使用效果更佳。因此,在河南省中部地区冬小麦生产中,使用含0.8%维大力的种衣剂包衣(V_c),并结合抽穗期使用66.7 mg/L的维大力叶面喷施(V_f)可促进小麦苗期生长并最终实现高产。

关键词 小麦; 维大力; 包衣; 叶面喷施; 增产

中图分类号 S512.1

文章编号 1007-4333(2025)04-0028-10

文献标志码 A

Effects of VDAL on the emergence and growth of wheat

JIANG Juan¹, WANG Wenzhong², HU Tiezhu³, ZHANG Yuemei¹, LIU Wenxue⁴,
GONG Zhizhong^{1*}, QI Junsheng^{4*}

(1. College of Biological Sciences, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Wenshang County Science and Technology Talent Exchange and Cooperation Center, Jining 272500, China;

3. School of Agriculture Henan, Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;

4. Shandong Jinteng Sweetpotato Research Institute, Jining 272504, China)

Abstract To investigate the effects of VDAL on the germination, seedling growth, and wheat yield in the field, winter wheat ‘Bainong 4199’ was selected as the experimental material. In the laboratory pot experiment, seeds were treated with 0.2% (mass percentage, V_1), 0.4% (V_2), and 0.8% (V_3) VDAL-contained seed coating, as well as seed coatings without VDAL (CK_1) and seeds without coating (CK), respectively. The wheat germination rate, seedling height, root length, and root-to-shoot ratio of wheat

收稿日期: 2024-08-12

基金项目: 济宁市重点研发计划(2022NYNS012)

第一作者: 蒋娟(ORCID: 0009-0001-9302-4188), 硕士研究生, E-mail: 19983784973@163.com

通讯作者: 齐俊生(ORCID: 0000-0002-7559-4718), 教授, 主要从事植物病理学研究, E-mail: junshqi@cau.edu.cn

巩志忠(ORCID: 0000-0001-6551-6014), 教授, 主要从事植物抗逆的分子生物学及基因沉默研究, E-mail: gongzz@cau.edu.cn

were determined. In the field experiment, wheat treated with a seed coating agent containing 0.8% VDAL (V_c), foliar application of VDAL powder at a concentration of 66.7 mg/L during the booting stage (V_f), and a combination of both (V_c+V_f) were compared to seed coated without VDAL (CK_1) and uncoated treatments (CK). The germination rate, seedling tiller number, root vitality, harvest yield, and yield components of wheat under different treatments were measured. The results showed that: In the laboratory pot experiment, on the 35th day of seedling growth after sowing, wheat plant height of V_3 was 7.78% and 18.56% higher than CK and CK_1 ($P<0.05$), respectively. In the field trial, V_c+V_f increased the number of spikes per hectare, grains per spike, and 1 000-grain weight by 12.20%, 7.20%, and 1.57% compared to CK_1 , respectively, leading to a 17.10% increase in theoretical yield. Compared to CK, the increases were 7.86%, 11.10%, and 1.86%, respectively, with a theoretical yield increase of 17.27%. In summary, the seed coating treatment and foliar spraying of VDAL have a promoting effect on wheat growth, yield, and yield components, and the combination of both has better effects. Therefore, in the central Henan region, using a 0.8% VDAL-contained seed coating (V_c) combined with VDAL powder at a concentration of 66.7 mg/L during the booting stage (V_f) can promote the growth of wheat seedlings and achieve high yields.

Keywords wheat; VDAL; seed-coating; foliar-spraying; wheat yield

我国是小麦种植面积最大的国家^[1-2]。一直以来,高产都是我国小麦生产首要追求的目标^[3],为提高小麦产量,须不断探索小麦增产技术措施。在小麦实际生产中,通过培育新品种来提高小麦的产量已变得愈加困难,扩大种植面积在我国更难以实现^[4],因此,亟需寻求突破性技术来提高小麦产量。

近年来,为减少农药、化肥不合理使用造成的环境污染问题,保障作物产量,植物生物刺激剂及免疫启动蛋白应运而生^[5-6]。植物生物刺激剂是一种不同于已往肥料的产品,它能够调节植物的多种代谢途径,又不改变植物原本的遗传途径,且低浓度应用便可促进作物正常生长^[5]。植物免疫启动蛋白(Plant Immune Priming Protein)是近年提出的1个新概念:由植物、动物或微生物产生的蛋白质分子或多肽,在植物正常的生长状态下使用时,通过与植物细胞膜外特定受体相互识别,提前启动植物固有的免疫系统。当遇到生物或非生物逆境胁迫时,植物能够快速、高效地唤醒免疫系统,发挥自身的最大潜力,同步实现抗逆、增产及品质的全面提升^[6]。维大力(*Verticillium dahliae* Asp-f2 like protein, VDAL)源于大丽花轮枝孢(*Verticillium dahliae*),通过发酵生产制成蛋白干粉,是一种锌离子结合蛋白^[7],可归为植物免疫启动蛋白,保质期超过2年。已有研究证明,包括小麦在内的多种植物,叶面喷施维大力能调节叶绿体光合天线蛋白、促进淀粉与糖代谢、调控8种植物激素信号通路,同步激活植物的胞外与胞内免疫反应途径^[6-7]。目前在多种作物上的试验结果表明,VDAL具有诱导多种植

物抗性、促进生长、大幅增产、提高品质等生物学功能^[6]。有关施用植物免疫启动蛋白VDAL对小麦生长发育及田间性状影响的研究还鲜见报道。本研究以冬小麦品种‘百农4199’为供试材料,通过维大力种子包衣及叶面喷施的方法,测定小麦苗期的出苗率、株高、根长、分蘖数、收获期产量及产量构成因素等指标,旨在探究维大力对冬小麦出苗、苗期生长及产量的影响,以期为植物免疫启动蛋白维大力(VDAL)在小麦生产上的大面积推广提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究选用的冬小麦品种为‘百农4199’,由河南科技学院胡铁柱教授提供。试验所用的维大力(VDAL)蛋白干粉,由北京中捷四方生物科技股份有限公司提供。

1.2 试验地概况

试验于2017—2020年在河南省新乡市朗公庙镇河南科技学院试验基地(113.54°E, 35.16°N,海拔76 m)进行,试验地为沙壤土。该试验区平均年降水量为573.4 mm,小麦全生育期平均降雨量196 mm。

1.3 试验设计

1.3.1 维大力室内盆栽试验

选取无病虫害、颗粒饱满的小麦种子,设置添加0.2%(质量百分比, V_1)、0.4%(V_2)和0.8%(V_3)维大力的福·戊种衣剂包衣和不添加维大力的种衣剂包衣

(CK₁)及不包衣(CK)的种子处理(表1)。将30粒小麦种子并列播种于同一方盆土壤中,置于22℃恒温、光照/黑暗周期(12 h/12 h)条件下萌发。每个处理设置6次重复。逐日观察并记录种子出苗率及幼苗株高,播种后第9天,从每个处理中随机选取15株幼苗,测定幼苗的株高、根长及根冠比^[8],计算平均值。

表1 室内试验的小麦种子处理
Table 1 Laboratory test of wheat seed treatment

处理 Treatment	种子处理 Seed treatment	具体步骤 Operation procedure
CK		
CK ₁	福·戊种衣剂包衣	0.214 g 种衣剂原粉兑水 3 mL, 种子 150 g, 拌种。
V ₁	福·戊种衣剂+0.2% 维大力包衣	0.170 g 的维大力原粉兑水 1 200 mL, 浓度为 2×10 ⁻⁶ g/mL, 0.214 g 种衣剂原粉兑此溶液 3 mL, 种子 150 g, 拌种。
V ₂	福·戊种衣剂+0.4% 维大力包衣	0.170 g 的维大力原粉兑水 600 mL, 浓度为 4×10 ⁻⁶ g/mL, 0.214 g 种衣剂原粉兑此溶液 3 mL, 种子 150 g, 拌种。
V ₃	福·戊种衣剂+0.8% 维大力包衣	0.170 g 的维大力原粉兑水 300 mL, 浓度为 8×10 ⁻⁶ g/mL, 0.214 g 种衣剂原粉兑此溶液 3 mL, 种子 150 g, 拌种。

1.3.2 维大力田间验证

2017—2018 年进行田间试验效果初筛,设置5种处理方式:CK、CK₁、A、B、C、D(表2)。每个处理试验面积为333.4 m²,在收获期进行考种测产。

2018—2019 和 2019—2020 年进行2年冬小麦生产试验,设置CK、CK₁、V_c、V_f和V_c+V_f处理(表2)。采用大区对比,每个处理面积为6 667 m²(10 亩)。大田播种后,三叶期调查基本苗数;返青期测定小麦分蘖并用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原

法^[9]测定根系活力;灌浆期调查小麦成穗数、白粉病发病情况,并用日本Konica Minolt公司生产的SPAD仪(型号SPAD-502)测定小麦旗叶叶绿素相对含量(SPAD);收获期每个大区选取3个点,每点取样3 m²,进行实收、脱粒、水分校正,计算产量并进行产量性状考种。实收小麦抽样送中粮(新乡)小麦有限公司进行容重、湿面筋含量、稳定时间等品质性状分析。同时,设置正常灌溉条件下观察CK、CK₁和V_c的抗倒伏情况,控水后评估CK₁和V_c小麦的抗旱能力,3次重复。

表2 田间试验处理
Table 2 Methods of field experiment

处理 Treatment	方法 Method	时期 Stage	维大力用量 Usage of VDAL
CK			
CK ₁	福·戊种衣剂包衣		
A	维大力叶面喷施	抽穗期	66.7 mg/L(1 g/667 m ² , 兑水 15 L)。
B	福·戊种衣剂+维大力叶面喷施	抽穗期	66.7 mg/L(1 g/667 m ² , 兑水 15 L)。
C	福·戊种衣剂+维大力包衣	播种期	21.4 g 种衣剂粉兑水 300 mL 添加 0.214 g 维大力原粉, 种子 15 kg, 拌种。
D	福·戊种衣剂+维大力包衣+维大力叶面喷施	播种期+抽穗期	播种期用量同 C。 抽穗期用量同 A。
V _c	福·戊种衣剂+0.8% 维大力包衣	播种期	21.4 g 种衣剂粉兑水 300 mL 添加 0.170 g 维大力原粉, 种子 15 kg, 拌种。
V _f	福·戊种衣剂+维大力叶面喷施	抽穗期	66.7 mg/L(1 g/667 m ² , 兑水 15 L)。

2 结果与分析

2.1 种衣剂添加维大力包衣对小麦生长性状的影响

2.1.1 种衣剂添加维大力包衣的最适浓度筛选

由表 3 可知,播种后第 3—4 天出苗情况显示,0.8%

维大力处理(V₃)对小麦出苗有显著的抑制效应。第 6 天,添加 0.2%、0.4% 和 0.8% 维大力包衣的处理组(V₁、V₂和 V₃)与福·戊种衣剂包衣对照(CK₁)和不包衣对照(CK)相比,出苗率无显著差异。然而,在播种后第 9 天, V₃ 的小麦植株根冠比和根长均高于其他处理(V₁、V₂)和对照组(CK、CK₁)。

表 3 不同浓度维大力包衣后小麦苗期的生长指标
Table 3 Growth indexes of wheat coated with different concentrations of VDAL at seedling stage

处理 Treatment	播种后的出苗率/% Seedling emergence rate after seedling			播种后第 9 天植株性状 Characteristics on the 9 th day after seeding		
	3 d	4 d	6 d	根长/mm Root length	株高/mm Height	根冠比 Root—shoot ratio
CK	0.433±0.085 ^a	0.983±0.017 ^a	0.983±0.017 ^a	166.87±28.43 ^b	169.40±9.23 ^a	0.33
CK ₁	0.133±0.047 ^b	0.942±0.028 ^{ab}	0.967±0.024 ^a	152.60±16.65 ^b	140.87±9.25 ^c	0.31
V ₁	0.175±0.043 ^b	0.958±0.043 ^{ab}	0.975±0.028 ^a	133.73±14.47 ^c	147.67±12.17 ^{bc}	0.30
V ₂	0.142±0.055 ^b	0.900±0.071 ^{ab}	0.933±0.053 ^a	163.13±18.07 ^b	144.53±9.19 ^c	0.30
V ₃	0.167±0.062 ^b	0.858±0.098 ^b	0.942±0.043 ^a	186.33±14.46 ^a	152.80±10.45 ^b	0.45

注:CK,不包衣对照;CK₁,不添加维大力的种衣剂包衣对照;V₁,V₂,V₃,分别为添加 0.2%(质量百分比)、0.4%、0.8% 维大力的种衣剂包衣处理。同列数据不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。
note: CK, control of seed uncoated treatment;CK₁, control of seed coated without VDAL treatment;V₁,V₂,V₃ are seed coated with 0.2% (mass percentage) , 0.4% , 0.8% VDAL-contained, respectively. Within the same column, different letters represent significant differences (P<0.05). The same below.

由表 4 可知,在温室条件下小麦播种后第 35 天,V₁、V₂和 V₃的小麦株高分别显著高于种衣剂对 照(CK₁)8.72%、17.80%、18.56%(P<0.05),其中 V₂和 V₃的小麦株高分别显著高于不包衣对照(CK)

表 4 不同浓度维大力包衣处理后的小麦株高
Table 4 Wheat plant height after different concentration of VDAL coating treatment mm

处理 Treatment	播种后时间/d Time after seeding			
	6	8	10	12
CK	105.73±6.12 ^a	156.13±3.64 ^a	174.30±5.40 ^a	212.00±16.08 ^a
CK ₁	84.43±2.40 ^b	126.07±3.35 ^b	142.77±3.64 ^b	179.00±5.35 ^b
V ₁	87.37±5.45 ^b	128.7±4.67 ^b	140.00±1.74 ^b	169.00±4.55 ^b
V ₂	86.7±2.69 ^b	128.37±2.89 ^b	145.10±2.63 ^b	164.67±8.99 ^b
V ₃	84.9±1.85 ^b	123.67±3.65 ^b	140.63±3.82 ^b	171.67±15.06 ^b

处理 Treatment	播种后时间/d Time after seeding		
	14	16	35
CK	250.88±7.25 ^a	283.32±18.30 ^a	283.44±25.42 ^b
CK ₁	209.73±4.38 ^b	242.65±20.51 ^b	257.68±29.28 ^c
V ₁	209.91±2.73 ^b	228.25±29.69 ^c	280.14±16.96 ^b
V ₂	212.30±3.38 ^b	244.24±17.35 ^b	303.55±10.96 ^a
V ₃	214.97±6.51 ^b	243.68±19.63 ^b	305.50±13.08 ^a

7.09%和7.78% ($P < 0.05$)。

2.1.2 维大力包衣对小麦田间生长及抗病的影响

由表5可知,0.8%维大力包衣(V_c)的小麦三叶期基本苗数有所下降,但统计分析显示差异未达到显著水平($P < 0.05$);三叶期 V_c 的分蘖发生显著晚于不包衣对照(CK)。冬后返青期调查 V_c 的1 m双行总茎数有所下降,但差异不显著。采用TTC还

原法测定返青期小麦根系活力, V_c 的小麦根系活力比CK₁高6.37%。

由表6可知, V_c+V_f 的小麦1 m双行成穗数高于对照(CK)。2019—2020年重复试验田间调查结果显示, V_f 和 V_c+V_f 的小麦在灌浆期旗叶的SPAD显著高于对照(CK),对白粉病的抗病能力强于对照(CK)。

表5 2018—2019年大田试验中维大力包衣后的小麦苗期田间生长指标

Table 5 Field growth indicators of wheat at the seedling stage after VDAL coating in 2018 - 2019

处理 Treatment	三叶期 Trileaf stage		返青期 Returning green stage	
	基本苗数 Seedling count	单株分蘖数 Tillering number	1 m双行总茎数 Stems number in 1m double row	根系活力/(ug/(g·h)) Root vitality
CK	312.00±7.24 ^a	2.77±0.84 ^a	472.20±69.70 ^a	104.26±11.94 ^a
CK ₁	309.60±26.33 ^a	1.38±0.57 ^b	432.60±45.04 ^a	98.78±5.87 ^a
V_c	296.40±17.42 ^a	1.45±0.66 ^b	434.40±28.23 ^a	105.07±6.46 ^a

注:CK,不包衣对照;CK₁,不添加维大力的种衣剂包衣对照; V_c ,添加0.8%(质量百分比)维大力的种衣剂包衣;下同。

note: CK, control of seed uncoated treatment; CK₁, control of seed coated without VDAL treatment; V_c , Seed coated with 0.8% (mass percentage) VDAL-contained. The same below.

表6 2019—2020年田间试验维大力处理后的小麦田间性状指标

Table 6 Field character indexes of wheat treated with VDAL in 2019 - 2020

处理 Treatment	1 m双行成穗数 Panicle number in 1 m double row	SPAD	白粉病指数 Disease index of powdery mildew
CK	318.00±30.45 ^a	52.28±2.54 ^b	33.97±9.44 ^a
V_f	316.40±37.78 ^a	57.12±1.24 ^a	27.97±6.18 ^a
V_c+V_f	329.60±31.36 ^a	56.78±0.84 ^a	29.15±4.56 ^a

注: V_f ,不添加维大力的种衣剂包衣,小麦抽穗期使用66.7 mg/L的维大力原粉叶面喷施。下同。

Note: V_f , Seed coated without VDAL, sprayed with 66.7mg/L VDAL at heading stage. The same below.

由图1可知, V_c 的小麦展现出在抗旱和抗倒伏方面的特性。与对照组(CK和CK₁)相比,添加维大力的种衣剂能够增强小麦对不利环境条件的耐受能力, V_c 的小麦植株展现出更少的倒伏现象和应对干旱条件更强的耐受性。

由图2可知,小麦成熟期, V_c+V_f 的植株保绿程度优于CK;小麦灌浆期,CK的小麦叶片在正午时段表现为趋近于针状卷曲状态,而经维大力处理(V_f 和 V_c+V_f)的小麦叶片状态表现得更为舒展,叶色浓绿程度和茎秆鲜活程度也高于CK,且SPAD显著高于CK($P < 0.05$)。

2.2 维大力对小麦产量及其构成因素的影响

由表7可知,2017—2018年,在抽穗期叶面喷施

维大力(A)后,相较于常规丰产对照(CK),小麦的产量及其产量构成三要素(千粒重、公顷穗数、穗粒数)均表现出不同程度的提升,其中单株穗粒数升高38.67%,达显著水平($P < 0.05$)。维大力种衣剂包衣结合抽穗期叶面喷施(D)相较于不含维大力的种衣剂对照(CK₁),籽粒增产率达到13.4%。

由表8可知,2018—2019年, V_c+V_f 小麦公顷穗数、单株穗粒数及千粒重与种衣剂对照(CK₁)相比,分别增长了12.2%、7.2%和1.57%,理论产量增加17.1%;与不包衣对照(CK)相比,公顷穗数、穗粒数和千粒重分别增长了7.86%、11.1%和1.86%,理论产量增加17.27%。

由表9可知,2019—2020年,在遭遇干热风的情

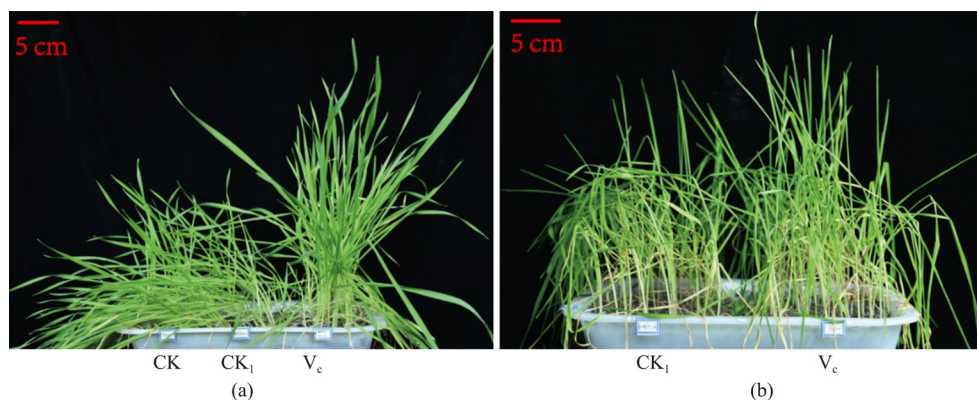


图 1 不同处理苗期抗倒伏(a)抗旱(b)情况

Fig. 1 Lodging resistance (a) and drought resistance (b) at seedling stage

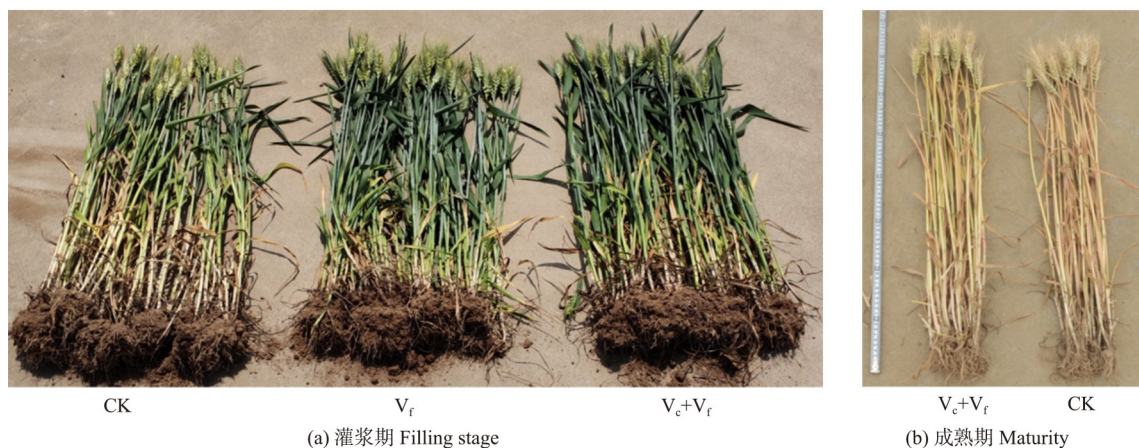


图 2 灌浆期和成熟期田间小麦植株保绿程度对比

Fig. 2 Comparison of green preservation degree in filling stage and maturity of wheat plants

表 7 2017—2018 年田间试验维大力不同处理方式下的小麦产量及产量构成因素

Table 7 Wheat yield and yield components of different VDAL treatments in field trials in 2017 - 2018

处理 Treatment	千粒重/g 1 000-grain weight	公顷穗数/(穗/hm ²) Panicle number per hectare	穗粒数 Kernels per spike	产量/(kg/hm ²) Yield
CK	44.92±0.52 ^b	4 645 655±453 535.48 ^{ab}	18.57±4.29 ^b	3 985.33±309.28 ^b
CK ₁	46.98±1.58 ^b	5 105 885±192 681.05 ^{ab}	24.40±1.59 ^{ab}	4 969.15±249.57 ^{ab}
A	46.22±0.69 ^b	4 862 430±333 633.37 ^{ab}	25.75±4.47 ^a	4 202.10±463.91 ^b
B	47.77±1.12 ^b	4 438 885±220 765.92 ^b	30.43±2.38 ^a	4 502.25±672.40 ^{ab}
C	52.02±2.36 ^a	4 915 790±154 205.44 ^{ab}	25.28±1.04 ^a	4 752.38±804.56 ^{ab}
D	48.45±2.75 ^{ab}	5 235 950±217 108.24 ^a	27.93±1.77 ^a	5 636.15±627.92 ^a

注:CK,不包衣的对照;CK₁,不添加维大力的种衣剂包衣对照;A,种子不包衣,抽穗期维大力叶面喷施处理;B,种衣剂包衣,抽穗期维大力叶面喷施处理;C,添加维大力的种衣剂包衣处理;D,添加维大力的种衣剂包衣结合抽穗期维大力叶面喷施处理。下同。

Note: CK, control of seed uncoated treatment; CK₁, control of seed coated without VDAL treatment; A, uncoated wheat, VDAL foliar sprayed treatment at heading stage; B, Wheat coated without VDAL, but sprayed with VDAL at heading stage; C, wheat coated with VDAL treatment; D, wheat coated with VDAL and sprayed at heading stage with VDAL. The same below.

表8 2018—2019年田间试验维大力处理的小麦产量及其构成因素
Table 8 Wheat yield and yield components of VDAL treatment in 2018 - 2019

处理 Treatment	千粒重/g 1 000-grain weight	公顷穗数/(穗/hm ²) Panicle number per hectare	穗粒数 Kernels per spike	理论产量/(kg/hm ²) Theoretical yield
CK	46.21±0.20 ^a	4 814 072.50±882 416.36 ^a	35.32±2.61 ^b	9 204.95±489.01 ^a
CK ₁	46.34±2.14 ^a	4 627 767.27±669 436.58 ^a	36.63±2.81 ^{ab}	9 215.45±795.38 ^a
V _c +V _f	47.07±0.91 ^a	5 192 595.00±610 742.22 ^a	39.26±3.41 ^a	10 794.60±707.21 ^a

况下,维大力处理(V_f和V_c+V_f)实收测产比不包衣对照(CK)分别增产1.07%和4.47%,其中产量构成因素之一的千粒重分别增加2.25%和4.98%,差异达显著水平($P<0.05$)。

表9 2019—2020年小麦实收测产
Table 9 Actual yield measurement of wheat in 2019 - 2020

处理 Treatment	实收面积/m ² Actual harvest area	实测籽粒重/kg Grain weight	千粒重/g 1 000-grain weight	实测含水量/(g/100 g) Water content	产量/(kg/hm ²) Yield	增产率/% Percentage increase
CK	800.04	671.35	41.75±0.10 ^c	8	8 862.75	--
V _f	820.04	693.44	42.69±0.38 ^b	8	8 957.70	1.07
V _c +V _f	826.71	722.97	43.83±0.05 ^a	8	9 258.60	4.47

注:表中小麦产量指标为实收现场的产量数据,含水率为13%。
Note: The wheat yield data in the table is the reduced yield and the water content is calculated at 13%.

2.3 维大力对小麦品质的影响
由表10可知,V_c+V_f的小麦在湿面筋值、稳定时间、弱化度方面有一定程度的增强,在面筋指数、吸水率、拉伸面积上有所降低,但综合分析来看,其品质指标消长均衡,且V_c+V_f、CK和CK₁之间的差异并不显著。

表10 维大力处理后的小麦品质
Table 10 Quality of wheat treated with VDAL

处理 Treatment	水分/% Moisture	容重/(g/L) Bulk density	不完善/% Imperfection	降落数值/s Falling number	湿面筋/% Wet gluten	面筋指数 Gluten index	吸水率/% Water absorption
CK	11.6	795	2.0	419	26.0	72.6	62.8
CK ₁	12.1	798	2.5	382	27.2	79.8	63.8
V _c +V _f	12.3	783	3.0	389	27.8	62.4	61.5

处理 Treatment	形成时间/min Development time	稳定时间/min Stability time	弱化度/FU Softening degree	拉伸面积/cm ² Tensile area	延伸性/mm Extensibility	最大阻力/EU Maximum resistance
CK	4.4	6.6	59	64	118	410
CK ₁	4.2	5.7	65	55	120	332
V _c +V _f	5.4	7.5	56	62	120	372

3 讨论

3.1 维大力包衣和叶面喷施对小麦产量的影响

植物免疫启动蛋白能够通过与植物细胞膜外特定受体相互识别,提前启动植物自身的防御免疫

系统^[6]。当遇到生物或非生物胁迫时,植物能够快速、高效地唤醒防御系统,发挥自身的最大潜力,同步实现抗逆、增产及品质的全面提升^[6]。为此,于2017—2018年的大田试验结果表明,维大力包衣和叶面喷施处理均能促进小麦增产,尤其是两者结合

使用时效果最佳,可提高小麦的千粒重、公顷穗数及穗粒数等产量构成因素。即使在2018年遭遇严重“倒春寒”的情况下,添加维大力的种衣剂包衣结合抽穗期维大力叶面喷施处理(D)的小麦产量仍稳定在5 636.15 kg/hm²,比对照(CK₁)增产13.4%;若与小麦常规生产中的不包衣对照(CK)相比,增产幅度可高达41%(表7)。随后,在2018—2019年优化了试验方案,结果得以验证,在维大力用量17.5 g/hm²的情况下,增产仍然达到了1 589.70 kg/hm²。维大力与市面上现有销售的植物刺激剂,如寡糖^[10-12]、腐植酸^[13-15]等相比,具有更多优势:作为单分子制剂,主要成分含量可以精确定量;用量极少但效果显著,用法更为简便;作为蛋白质较活菌制剂性能更为稳定,可与化肥农药复配。

3.2 维大力种子处理对小麦生长发育的影响

水资源短缺是全球农业发展面临的挑战^[16],冬小麦常面临着冬季低温、干旱的严峻挑战,再加上冬小麦本身生育期长的特点,对水分的吸收能力显得尤为重要^[16-18]。根系作为小麦吸收水分的主要器官,对干旱胁迫有着最先的感知和反映^[18-19],发达的根系可提升小麦的生长势和对干旱胁迫的抵抗能力^[20-24]。本研究结果显示,种衣剂添加0.8%的维大力包衣处理(V₃)小麦种子后,小麦株高在苗期开始阶段显著低于空白对照(CK),但根冠比增加,随着时间的推移,其株高逐渐赶上并显著超过对照组(CK、CK₁)(表4),这可能源于前期小麦将更多能量用于根系发育,导致地上部生长暂时受到抑制,但后期发达的根系保障了小麦对水分和营养物质的吸收,从而促进了地上部分的生长^[25];其中维大力处理的小麦,抗旱、抗倒伏能力提升,这可能也与发达的根系有关。在大田测产验收过程中还发现,经维大力处理的小麦在收获期植株茎秆的保绿及鲜活程度好于对照组(图2(b)),推测施用维大力可以减缓小麦植株的衰老^[26],延长小麦的灌浆时间,籽粒干物质积累量增多,这可能是促成小麦最终增产的重要原因。

3.3 维大力处理小麦对叶绿素含量的影响

叶绿素是光合作用中的主要参与者^[27],叶绿素含量是反映其光合能力的重要指标之一,直接影响着光合作用的速率和光合产物的形成,最终影响作物的产量及品质^[28]。2019—2020年田间试验证实,经维大力处理(V_f和V_c+V_f)后的小麦在灌浆期的

叶片颜色更浓绿,并且中午高温条件下,小麦叶片仍然保持舒展(图2(a)),更有利于提高光合效率,这一推测通过其SPAD显著高于对照(CK)得以证实(表6)。考种结果也证明,经维大力处理的小麦,千粒重得到显著提高,只是由于受干热风的影响,2019—2020年的最终增产效果未达到显著水平。

3.4 维大力处理对小麦品质的影响

小麦品质是一个综合概念,包括商品性状、食用品质和营养品质,不同产品及加工方式对不同品质小麦的需求也不尽相同^[29-31],从小麦品质测定结果来看,维大力处理的小麦与对照组相比,各个品质指标消长不一,相互之间对比不存在显著的优劣差异。综合分析表明,维大力的使用可提高小麦产量,同时并没有降低小麦原有的品质,解决了一直以来小麦增产措施下品质不优的难题。

4 结 论

经过室内及大田试验验证,在种衣剂中添加0.8%(质量百分数)的维大力进行小麦种子包衣,能够显著促进小麦苗期根的生长,提高根冠比,为小麦地上部生长发育、抗逆、抗倒伏及延缓植株衰老奠定基础。结合抽穗期叶面喷施维大力(1 g/667 m²,兑水15 L),可提高小麦灌浆期叶绿素含量8.61%($P<0.05$),增强抗逆能力,千粒重增加4.98%($P<0.05$),最终实现小麦增产17.10%。综上,在冬小麦生产中,种衣剂中添加0.8%的维大力,并于抽穗期叶面喷施维大力(1 g/667 m²,兑水15 L),可促进小麦苗期生长并实现大幅增产。

参考文献 References

- [1] 马文峰,陈杨,邹军顺. 2017年中国小麦市场分析回顾及中远期展望[J]. 粮食加工, 2018, 43(4): 1-6
Ma W F, Chen Y, Zou J S. Analysis and long-term outlook of China's wheat market in 2017 [J]. *Grain Processing*, 2018, 43 (4): 1-6 (in Chinese)
- [2] 谷秀娟,王彦行. 中国小麦产业国际竞争力分析[J]. 产业与科技论坛, 2015, 14(23): 11-12
Gu X J, Wang Y X. Analysis on the international competitiveness of wheat industry in China [J]. *Industrial & Science Tribune*, 2015, 14(23), 11-12 (in Chinese)
- [3] 孙瑞阳,徐玉轩,张卫东,赵夕冉,黄德华,宫力郡,刘琪迹. 推进小麦种业高质量发展,加快发展新质生产力[J]. 种子科技, 2024, 42(20): 130-133
Sun R Y, Xu Y X, Zhang W D, Zhao X R, Huang D H, Gong L H, Liu Q E. Promote the high-quality development of wheat seed industry and accelerate the development of new quality productivity [J]. *Seed Science*

- and Technology*, 2024, 42(20): 130-133 (in Chinese)
- [4] 李荣强, 陈轩, 施龙中. 中国主粮种植面积变化的影响因素: 基于荟萃分析[J]. 科技导报, 2024, 42(7): 76-83
Li R Q, Chen X, Shi L Z. On factors influencing the acreage of staple crops in China: Evidence from a meta-analysis[J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(7): 76-83 (in Chinese)
- [5] 谢尚强, 王文霞, 张付云, 尹恒. 植物生物刺激素研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(3): 487-496
Xie S Q, Wang W X, Zhang F Y, Yin H. Research progress of plant biostimulants[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2019, 35(3): 487-496 (in Chinese)
- [6] 黄朝武, 杨瑞雪. 中国农业大学科研团队研制出“植物免疫启动蛋白”: “植物疫苗”步入农业生产[N]. 农民日报, 2024-01-03(6)
Huang Z W, Yang R X. Research team from China Agricultural University develops “plant immune initiator protein”: “Plant vaccine” entering agricultural production[N]. *Peasants' Daily*, 2024-01-03(6) (in Chinese)
- [7] Ma A F, Zhang D P, Wang G X, Wang K, Li Z, Gao Y H, Li H C, Bian C, Cheng J K, Han Y N, Yang S H, Gong Z Z, Qi J S. *Verticillium dahliae* effector VDAL protects MYB6 from degradation by interacting with PUB25 and PUB26 E3 ligases to enhance *Verticillium* wilt resistance [J]. *Plant Cell*, 2021, 33(12): 3675-3699
- [8] 秦晓梁. 小麦选育过程中根冠比值和异速生长关系的演化[D]. 兰州: 兰州大学, 2013
Qin X L. Evolution of the relationship between root-shoot ratio and allometric growth in wheat breeding[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013 (in Chinese)
- [9] Kong L A, Wang F H, Feng B, Li S D, Si J S, Zhang B. A root-zone soil regime of wheat: physiological and growth responses to furrow irrigation in raised bed planting in Northern China [J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1): 154-162
- [10] 王永. 寡糖在小麦生产上的应用效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 1-32.
Wang Y. Study on the effect of application effect of oligosaccharides in wheat production [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2014: 1-32 (in Chinese)
- [11] 刘清玮, 黄曦漫, 李想, 刘良尧. 壳聚糖在作物栽培中的研究进展[J]. 吉林农业, 2018, (9): 59-60
Liu Q W, Huang X M, Li X, Liu L Y. Research progress of chitosan in crop cultivation[J]. *Agriculture of Jilin*, 2018 (9): 59-60 (in Chinese)
- [12] 张运红, 和爱玲, 杨占平, 郑春风, 杜君, 宝德俊, 姚健, 杨焕焕. 海藻酸钠寡糖灌根处理对小麦光合特性、干物质积累和产量的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(11): 1-5
Zhang Y H, He A L, Yang Z P, Zheng C F, Du J, Bao D J, Yao J, Yang H H. Effects of root-irrigation with alginate oligosaccharide solution on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield of wheat [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(11): 1-5 (in Chinese)
- [13] 张水勤, 袁亮, 林治安, 李燕婷, 胡树文, 赵秉强. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065-1076
Zhang S Q, Yuan L, Lin Z A, Li Y T, Hu S W, Zhao B Q. Advances in humic acid for promoting plant growth and its mechanism[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 1065-1076 (in Chinese)
- [14] 张瑜, 王若楠, 邱小倩, 刘亮, 李宝珍, 杨金水, 袁红莉. 腐植酸对植物生长的促进作用[J]. 腐植酸, 2018, (2): 5-9
Zhang Y, Wang R N, Qiu X Q, Liu L, Li B Z, Yang J S, Yuan H L. Function of humic acid on promoting plant growth [J]. *Humic Acid*, 2018, (2): 5-9 (in Chinese)
- [15] Muscolo A, Sidari M, Attinà E, Francioso O, Tugnoli V, Nardi S. Biological activity of humic substances is related to their chemical structure [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 75-85
- [16] 山仑. 充分挖掘植物自身的抗旱节水潜力[J]. 大自然, 2009, 30(6): 1
Shan L. Fully tap the potential of plants for drought resistance and water saving potential of plants themselves[J]. *China Nature*, 2009, 30(6): 1 (in Chinese)
- [17] Yousfi N, Slama I, Ghnaya T, Savouré A, Abdely C. Effects of water deficit stress on growth, water relations and osmolyte accumulation in *Medicago truncatula* and *M. Laciniata* populations[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2010, 333: 205-213
- [18] Nielsen D C, Vigil M F, Benjamin J G. The variable response of dryland corn yield to soil water content at planting [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(2): 330-336
- [19] 申泽峰, 颜玉倩, 胡毅. 河北省南部干旱特征及其对冬小麦产量的影响分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 76-81
Shen Z Z, Yan Y Q, Hu Y. Analysis of drought characteristics and its effect on winter wheat in south part of Hebei Province[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, 39(2): 76-81 (in Chinese)
- [20] 方燕, 闵东红, 高欣, 王中华, 王军, 刘萍, 刘霞. 不同抗旱性冬小麦根系时空分布与产量的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2922-2934
Fang Y, Min D H, Gao X, Wang Z H, Wang J, Liu P, Liu X. Relationship between spatiotemporal distribution of roots and grain yield of winter wheat varieties with differing drought tolerance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2922-2934 (in Chinese)
- [21] Hammer G L, Dong Z S, McLean G, Doherty A, Messina C, Schussler J, Zinselmeier C, Paszkiewicz S, Cooper M. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the US Corn belt[J]. *Crop Science*, 2009, 49(1): 299-312
- [22] Araus J L, Slafer G A, Reynolds M P, Royo C. Plant breeding and drought in C3 cereals: What should we breed for [J]. *Annals of Botany*, 2002, 89(7): 925-940
- [23] Abdolshahi R, Nazari M, Safarian A, Sadathossini T S, Salarpour M, Amiri H. Integrated selection criteria for drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) breeding programs using discriminant analysis [J]. *Field Crops Research*, 2015, 174: 20-29
- [24] Wasson A P, Richards R A, Chatrath R, Misra S C, Sai Prasad S V, Rebetzke G J, Kirkegaard J A, Christopher J, Watt M. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(9): 3485-3498
- [25] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 36-46
Yang J C. Relationships of rice root morphology and physiology with the formation of grain yield and quality and the nutrient absorption and utilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 36-46 (in Chinese)
- [26] 王晨阳, 马元喜, 周苏玫, 周继泽, 司志浩. 土壤干旱胁迫对冬小麦衰老的影响[J]. 河南农业大学学报, 1996, 30(4): 1-5
Wang C Y, Ma Y X, Zhou S M, Si Z H. Study on effects of soil drought stress on winter wheat senescence [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 1996, 30(4): 1-5 (in Chinese)
- [27] Lin Z H, Chen L S, Chen R B, Zhang F Z, Jiang H X, Tang N. CO₂ assimilation, ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase,

- carbohydrates and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of tea leaves in response to phosphorus supply [J]. *BMC Plant Biology*, 2009, 9:43
- [28] 由继红, 陆静梅, 杨文杰. 钙对低温胁迫下小麦幼苗光合作用及相关生理指标的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 693-696
You J H, Lu J M, Yang W J. Effects of Ca^{2+} on photosynthesis and related physiological indexes of wheat seedlings under low-temperature stress [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5): 693-696 (in Chinese)
- [29] 赵鹏涛, 赵卫国, 罗红炼, 翟周平, 李保军, 苟升学. 小麦主要品质性状相关性主成分分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 7-13
Zhao P T, Zhao W G, Luo H L, Zhai Z P, Li B J, Gou S X. The main quality traits of wheat: Correlation analysis and principal components analysis [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(21): 7-13 (in Chinese)
- [30] 李艳敏, 李珊, 王月娥, 沈家成, 张文明, 郑文寅, 姚大年. 安徽省33个小麦品种烘焙品质研究[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(6): 26-32
Li Y M, Li S, Wang Y E, Sheng J C, Zhang W M, Zheng W Y, Yao D N. Research on baking quality of thirty-three varieties of wheat grown in Anhui province [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2017, 25(6): 26-32 (in Chinese)
- [31] 李景红. 小麦农艺性状与品质特性的多元分析与评价[J]. 农业与技术, 2017, 37(20): 26
Li J H. Multivariate analysis and evaluation of agronomic traits and quality characteristics of wheat [J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(20): 26 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 蒋娟, 硕士。2018年9月—2021年6月就读于中国农业大学生物学院。参与济宁市重点研发计划(2022NYNS012)。2019—2021年连续2年获得中国农业大学硕士二等学业奖学金。



通讯作者简介: 巩志忠, 博士, 中国农业大学生物学院教授; 河北大学副校长。先后在美国普渡大学、亚利桑那大学从事植物抗逆的分子生物学及基因沉默的研究。2002年回国, 被聘为中国农业大学教授, 同年获国家自然科学基金委“国家杰出青年基金”资助(2003—2006); 2003年被科技部聘为国家重点基础研究项目(973项目)首席科学家, 2005年获教育部长江学者特聘教授, 2006年获中国青年科技奖。2012—2017年, 获基金委创新研究群体项目资助。目前任 *Journal of Integrative Plant Biology* 共同主编, 曾任 *Plant Physiology*、*Plant Cell & Physiology*、*Physiologia Plantarum*、《中国科学·生命科学》等杂志编委。主要从事植物抗旱、基因表达调控分子机理以及植物逆境改进的应用研究。在 *Cell*, *PNAS*, *Plant Cell*, *Plant Physiology*, *Journal of Integrative Plant Biology*, *Nature Communications* 等发表论文100余篇。



通讯作者简介: 齐俊生, 博士, 现任山东金藤甘薯研究院教授, 主要从事棉花黄萎病抗性分子遗传, 棉花黄萎病抗性分子设计育种, 并致力于新型植物疫苗维大力(VDAL)的分子机理研究、产品创制与产业化, 发表解析了VDAL在植物胞内分子机理的论文多篇。曾任第九届中国植物保护学会抗病虫专业委员会主任, 第十届理事; *Journal of Cotton Research* 资深编委。维大力(VDAL)发明专利获中、美、俄、澳、欧盟等9国授权, 获北京市知识产权局优秀项目, 金桥个人一等奖, 三农金桥优秀奖。