

车 阳, 蒋伟勤, 李 可, 等. 二氢卟吩铁对不同生育期小麦抗渍害能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1627-1634.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.08.002

## 二氢卟吩铁对不同生育期小麦抗渍害能力的影响

车 阳<sup>1</sup>, 蒋伟勤<sup>1</sup>, 李 可<sup>1</sup>, 文廷刚<sup>1</sup>, 杨文飞<sup>1</sup>, 杜小凤<sup>1</sup>, 顾大路<sup>1</sup>, 徐永刚<sup>2</sup>, 杨 威<sup>2</sup>  
(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 淮阴师范学院, 江苏 淮安 223300)

**摘要:** 为探究二氢卟吩铁(ICE6)对不同生育期小麦抗渍害能力的影响,本研究采用盆栽方式在孕穗期和开花期通过人工淹水处理来模拟小麦渍害过程。试验处理设置为小麦渍害前喷施不同质量浓度 0.02% ICE6; 0 mg/L (CW)、100 mg/L (E1W)、200 mg/L (E2W)、300 mg/L (E3W)、400 mg/L (E4W), 同时增设常规种植为对照 (CK)。结果表明,与 CK 相比,CW 处理显著降低了小麦籽粒产量;不同质量浓度 ICE6 于孕穗期和开花期进行渍前喷施处理可以提高小麦产量,其中孕穗期渍前 ICE6 喷施处理 E2W~E4W 效果较好,相比 CW 处理产量显著提高;开花期渍前 ICE6 喷施处理 E1W~E3W 效果较好,相比 CW 处理产量显著提高,但均未达到 CK 水平。外源 ICE6 喷施处理产量提高的主要原因是穗粒数和千粒质量的提高,并且处理后 7~28 d 剑叶叶绿素含量大于 CW 处理,使植株花后地上部光合同化产物积累量以及开花期至成熟期群体生长率随着植株光合生产能力提高而提高,从而使植株在成熟期具有较高的干物质积累量,并且在成熟期植株干物质分配中,籽粒占据较高的积累量及比例,最终使小麦产量得到提高。本研究结果表明在小麦孕穗期和开花期渍前喷施外源 ICE6 可以提高小麦抗渍害能力,减轻渍害对小麦产量的影响。

**关键词:** 小麦; 产量; 二氢卟吩铁; 渍害; 光合物质生产

**中图分类号:** S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)08-1627-08

## Effects of iron chlorine e6 on waterlogging resistance of wheat at different growth stages

CHE Yang<sup>1</sup>, JIANG Wei-qin<sup>1</sup>, LI Ke<sup>1</sup>, WEN Ting-gang<sup>1</sup>, YANG Wen-fei<sup>1</sup>, DU Xiao-feng<sup>1</sup>, GU Da-lu<sup>1</sup>, XU Yong-gang<sup>2</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>

(1. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences in Xuhuai Region of Jiangsu, Huai'an 223001, China; 2. Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of iron chlorine e6 (ICE6) on waterlogging resistance of wheat at different growth stages, this experiment was carried out by pot experiment. We simulated the waterlogging process of wheat by artificial flooding at booting stage and flowering stage. The experimental treatments were set to spray different concentrations of

0.02% ICE6; 0 mg/L (CW), 100 mg/L (E1W), 200 mg/L (E2W), 300 mg/L (E3W), 400 mg/L (E4W) before wheat waterlogging, and the conventional planting was added as the control (CK). The results showed that compared with CK, CW treatment significantly reduced wheat grain yield. Spraying different concentrations of ICE6 before waterlogging at booting stage and flowering stage could increase wheat yield. Among them, the effect of E2W treatment-E4W treatment at booting stage was bet-

收稿日期: 2022-12-20

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[ CX(21)1011 ]; 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-03); 淮安市农业科学研究院科研发展基金项目(HNY202114)

作者简介: 车 阳(1996-), 男, 山东菏泽人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为植物逆境生理与调控技术。(E-mail) cheyang@jaas.ac.cn

通讯作者: 顾大路, (E-mail) gudalu666@aliyun.com; 杜小凤, (E-mail) 15061234456@163.com

ter, and the yield was significantly higher than that of CW treatment. The effect of E1W treatment-E3W treatment at flowering stage was better, and the yield was significantly higher than that of CW treatment, but it did not reach the level of CK. The main reason for the increase in yield of exogenous ICE6 spraying treatment was the increase in the number of grains per spike and 1 000-grain weight. Moreover, the chlorophyll content of the flag leaves at 7-28 days after treatment was higher than that of CW treatment. The accumulation of photosynthetic assimilation products after flowering and the population growth rate from flowering to maturity stage increased with the increase of plant photosynthetic material production capacity. Therefore, the plant had a higher dry matter accumulation at maturity stage, and in the dry matter distribution of the plant at maturity stage, the grain occupied a higher accumulation and proportion, and finally the wheat yield was improved. The results of this study showed that spraying exogenous ICE6 before waterlogging at booting stage and flowering stage of wheat could improve the resistance of wheat to waterlogging and reduce the effect of waterlogging on wheat yield.

**Key words:** wheat; yield; iron chlorine e6; waterlogging; photosynthetic matter production

小麦作为全球分布范围最广、种植面积最大的粮食作物之一,在国际粮食贸易以及保障地区粮食安全等方面发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。小麦作为中国第三大粮食作物,在中国商品粮构成中占据重要地位<sup>[3]</sup>。长江中下游地区是中国重要的小麦产区,该地区小麦生育期雨量充足,集中于3-5月份,此时小麦正处于拔节孕穗期至抽穗灌浆期,降水量占整个小麦生育期的60%以上,此时降水量经常超过小麦该时期需水量,导致渍害发生<sup>[4-5]</sup>。渍害作为长江中下游麦区高产稳产的主要制约因素之一,是由于长期降雨或地势低洼排水不良导致土壤水分含量过高,使植株长期遭受水分胁迫从而影响到植株正常生长发育导致产量降低的一种常见的农业灾害。拔节孕穗期和开花期是小麦的需水敏感期,研究结果表明,该时期发生渍害会导致植株叶片叶绿素含量下降,影响光合作用,使得穗粒数和千粒质量下降导致产量降低<sup>[6-7]</sup>。

二氢卟吩铁(iron-chlorine e6, ICE6)是一种新型植物免疫诱抗剂,是中国拥有自主知识产权的新型产品,于2018年获得农药登记,在水稻<sup>[8]</sup>、油菜<sup>[9]</sup>、烟草<sup>[10]</sup>等多种植物上均取得了较好的应用效果,研究结果表明,ICE6可以调控叶绿素的降解(延缓降解)与合成,从而增强作物叶片的光合作用,以生产更多的有机物,从而促进植物的产量提高。目前缓解小麦抗渍害的技术措施主要有增施肥料、喷施外源调节物质等<sup>[11]</sup>,且这些技术均取得了一定应用效果。但ICE6应用于小麦抗渍害方面的研究鲜见报道。本研究拟通过盆栽试验模拟小麦产量形成关键生育期渍害,探究ICE6不同质量浓度以及不同应用时期处理对小麦抗渍害能力的影响,以为长江中下游地区小麦抗逆稳产栽培技术的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与供试材料

试验于2021-2022年在江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所试验基地开展,该地属于北亚热带湿润季风气候,降雨充沛,四季分明,年平均气温14.7℃,年平均日照时数2 055 h,年平均降水量927 mm。供试品种为当地代表性小麦品种淮麦404。供试药剂为0.02%二氢卟吩铁可溶性粉剂,由南京百特生物工程有限公司生产。

### 1.2 试验处理

试验采用盆栽试验方式开展。土壤自然风干后过筛,与肥料混匀,每盆装土15 kg,浇水沉实后进行播种,参照当地高产栽培氮肥运筹(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O施用量分别按照240 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup>、120 kg/hm<sup>2</sup>计算,基肥与追肥比例为6:4),全生育期每盆施用氮肥(N)1.60 g,基肥于播种前施用,追肥于倒2.5叶期施用,磷肥和钾肥每盆施用0.84 g,全部基施。11月10日播种,每盆播种子20粒,于3叶期留长势一致的幼苗10株/盆。

通过在孕穗期和开花期进行淹水处理来模拟小麦关键生育期的渍害过程,以探究ICE6对小麦抗渍害能力的影响。试验设置不同质量浓度的0.02%二氢卟吩铁处理,分别为:喷施ICE6 0 mg/L (CW)、100 mg/L (E1W)、200 mg/L (E2W)、300 mg/L (E3W)、400 mg/L (E4W),溶液添加0.01%的吐温20,以喷施至叶面湿润且无液滴积聚为标准。在喷施ICE6和清水后进行淹水处理,即在小麦处于孕穗期和开花期提前2 d分别进行ICE6喷施处理,处理2 d后每个盆进行浇水,连续7 d保持盆内水面1~2 cm,渍水结束后排掉水分按照正常措施管理直至成

成熟期。此外设置常规种植不淹水、不喷施 ICE6 作为对照 (CK), 在自然条件下正常生长。

### 1.3 测定方法与数据计算

分别于孕穗期和开花期淹水处理第 7 d、14 d、21 d、28 d 采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪进行相对叶绿素含量测定, 测定时分别在剑叶上、中、下处测定 3 次, 取平均值作为此叶的 SPAD 值, 每个小区测定 10 叶, 取平均值作为此小区 SPAD 值。在成熟期, 每个处理取 5 盆小麦, 考察穗数和穗粒数等产量构成因素, 脱粒后自然晾干测定千粒质量。于开花期和成熟期, 各处理取样 3 盆, 按照器官 (茎鞘+叶片、颖壳+穗轴、籽粒) 分开, 105 ℃ 杀青 30 min, 80 ℃ 烘干至恒质量称取质量, 参照文献 [12]、[13] 的方法进行计算: 营养器官花前贮藏同化物转运量 = 开花期营养器官干质量 - 成熟期营养器官干质量; 花前贮藏干物质转运量对籽粒产量的贡献率 = 花前贮藏干物质转运量 / 成熟期籽粒干质量 × 100%; 花后干物质积累量 = 成熟期干物质积累量 - 开花期干物质积累量; 营养器官花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率 = 花后地上部干物质积累量 / 成熟期籽粒干质量 × 100%; 群体生长率  $[g/(m^2 \cdot d)] = (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)$ 。式中,  $W_1$  和  $W_2$  为前后 2 次测定的干物质质量,  $t_1$  和  $t_2$  为前后 2 次测定的时间。

### 1.4 统计与分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据录入计算, 用 SPSS 22.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 渍前喷施 ICE6 对不同时期小麦产量及其构成因素的影响

对不同处理下小麦产量及其构成因素进行方差分析, 结果 (表 1) 表明, 处理时期、ICE6 质量浓度梯度对小麦籽粒产量具有显著或极显著影响。在产量构成因素方面, 不同处理时期和不同 ICE6 质量浓度梯度对穗粒数和千粒质量均有极显著影响, 但对穗数无显著影响, 二者互作效应对各产量构成因素的影响均不显著, 但对籽粒产量的影响达显著水平。

由表 2 可知, 与 CK 相比, CW 处理显著降低了孕穗期和开花期小麦籽粒产量。采用不同质量浓度 ICE6 于孕穗期和开花期进行渍前喷施处理, 可以不同程度提高小麦产量, 其中孕穗期 E2W 处理 ~ E4W 处理效果较好, 相比 CW 处理产量显著提高; 开花期

渍前喷施 ICE6, E1W 处理 ~ E3W 处理效果较好, 相比 CW 处理产量显著提高; 但两时期各处理的籽粒产量均显著低于 CK。说明在渍前进行 ICE6 喷施处理可以一定程度上减轻渍害对小麦产量的不利影响, 但未能恢复到常规种植水平, 整体来说在孕穗期和开花期可以分别选择 E3W、E2W 处理的 ICE6 质量浓度作为适宜喷施的质量浓度。

表 1 产量及其构成因素在不同处理时期及不同质量浓度间的方差分析

Table 1 Analysis of variance of yield and its components in different treatment periods and different concentration gradients

变异来源	自由度	F 值			
		籽粒产量	穗数	穗粒数	千粒质量
处理时期 (T)	1	50.46 **	1.96	41.76 **	35.19 **
ICE6 质量浓度梯度 (M)	3	4.27 *	1.48	12.45 **	19.64 **
M×T	3	3.45 *	1.21	1.264	0.01

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上影响显著。ICE6: 二氢卟吩铁。

孕穗期和开花期渍前喷施 ICE6 处理相比 CW 处理及 CK 在穗数方面无显著差异, 说明孕穗期以后渍水处理对穗数影响较小。在穗粒数方面, 与 CK 相比, 孕穗期和开花期 CW 处理穗粒数分别降低了 18.67% 和 13.93%, 差异显著。不同质量浓度 ICE6 在孕穗期和开花期渍前喷施处理相比 CW 处理可以不同程度提高穗粒数, 其中孕穗期 E2W 处理效果最好, 相比 CW 提高了 12.83%, 差异显著, 但相比 CK 显著降低了 8.24%; 开花期渍前喷施处理方面, E1W 处理 ~ E3W 处理效果较好, 相比 CW 处理提高了 7.64% ~ 10.02%, 差异显著, 但相比 CK 显著降低 5.31% ~ 7.35%。整体来看 E2W 处理具有较好提升穗粒数的效果。

与 CK 相比, 孕穗期和开花期 CW 处理千粒质量分别降低了 11.56% 和 9.68%, 差异显著。其中 E3W、E4W 处理相比 CW 处理千粒质量显著提高, 但显著低于 CK; 相比 CW 处理, 开花期 E2W 处理 ~ E4W 处理显著提高了盆栽小麦千粒质量, 但显著低于 CK。整体来看 E3W 处理和 E4W 处理具有较好的提升千粒质量的效果。

### 2.2 渍前喷施 ICE6 对孕穗期、开花期小麦剑叶 SPAD 值的影响

由图 1 和图 2 可知, 不同时期处理的小麦剑叶

SPAD 值随着处理时间延长总体呈下降趋势。相比 CK, 孕穗期和开花期 CW 处理剑叶 SPAD 值在处理 7~28 d 显著降低。在孕穗期, E2W 处理~E4W 处理剑叶 SPAD 值显著高于 CW 处理。在开花期, 相比 CW 处理, 不同质量浓度 ICE6 渍前喷施处理在渍后 7~28 d 均使小麦剑叶 SPAD 值显著提高。说明 ICE6 喷施处理可以提高孕穗期和开花期渍胁迫下小麦剑叶叶绿素含量, 延缓叶片衰老, 增强植株光合生产能力, 有利于渍胁迫后产量恢复与形成。

表 2 渍前喷施不同质量浓度 ICE6 处理对小麦产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of spraying different concentrations of iron chlorine e6 (ICE6) before waterlogging on wheat yield and its components

时期	处理	穗数 (个/盆)	穗粒数	千粒质量 (g)	籽粒产量 (g, 1 盆)
孕穗期	CW	41.00a	35.84d	43.21c	54.11d
	E1W	41.33a	37.67c	44.58bc	59.24c
	E2W	40.67a	40.44b	45.10bc	62.72b
	E3W	42.00a	38.67c	46.27b	66.05b
	E4W	41.67a	37.11cd	45.61b	63.46b
	CK	43.00a	44.07a	48.86a	84.73a
开花期	CW	41.00a	37.93c	44.13c	62.00d
	E1W	42.33a	40.83b	45.54bc	73.78bc
	E2W	42.00a	41.73b	46.07b	76.82b
	E3W	41.33a	40.90b	47.16b	74.05bc
	E4W	42.67a	39.27c	46.59b	69.52c
	CK	43.00a	44.07a	48.86a	84.73a

CW、E1W、E2W、E3W、E4W 处理分别为喷施二氢叶吩铁 0 mg/L、100 mg/L、200 mg/L、300 mg/L、400 mg/L 后进行淹水处理, CK 为常规种植不淹水、不喷施二氢叶吩铁。同一时期同一列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 渍前喷施 ICE6 对小麦成熟期地上部干物质分配的影响

由表 3 可知, 与 CK 相比, 孕穗期和开花期 CW 处理显著降低了小麦成熟期地上部营养器官及穗部籽粒的干物质积累量, 其中茎鞘和叶片降低了 13.16%~17.38%, 穗轴和颖壳降低了 11.40%~16.31%, 籽粒降低了 26.83%~36.14%。与 CW 处理相比, 喷施不同质量浓度 ICE6 在孕穗期和开花期均可以提高成熟期地上部营养器官及穗部籽粒的干物质积累量; 其中孕穗期 E3W 处理和 E4W 处理下茎鞘和叶片中的干物质积累量显著大于 CW 处理, E1W 处理~E4W 处理下穗轴+颖壳以及籽粒中的干物质积累量均显著大于 CW 处理; 开花期 E1W 处

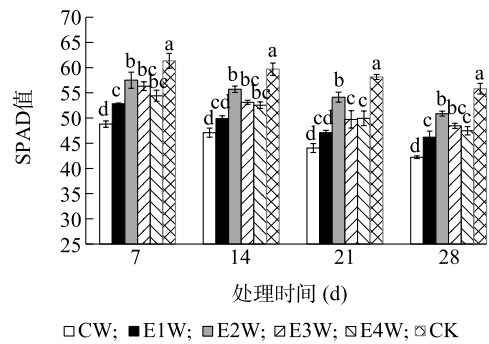


图 1 不同浓度 ICE6 渍前喷施处理对孕穗期小麦剑叶 SPAD 值的影响

Fig.1 Effects of spraying different concentrations of ICE6 before waterlogging on SPAD value of flag leaf of wheat at booting stage

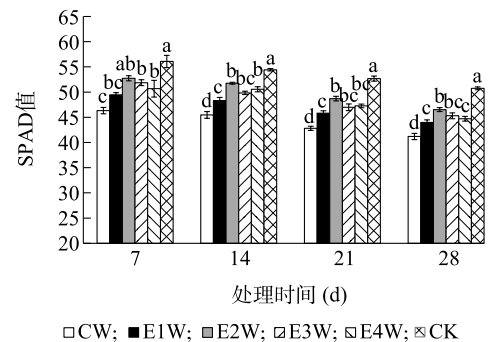


图 2 不同浓度 ICE6 渍前喷施处理对开花期小麦剑叶 SPAD 值的影响

Fig.2 Effects of spraying different concentrations of ICE6 before waterlogging on SPAD value of flag leaf of wheat at flowering stage

理~E4W 处理下茎鞘+叶片以及籽粒的干物质积累量均显著大于 CW 处理, 穗轴和颖壳中的干物质积累量在 E1W 处理~E3W 处理下显著大于 CW 处理。在干物质积累量占比方面, 相比 CW 处理, CK 成熟期营养器官干物质积累比例显著降低, 但籽粒干物质积累比例显著提高。说明渍水对植株各器官的生长发育产生了不利影响, 喷施二氢叶吩铁具有一定的缓解效应, 有利于产量形成。

### 2.4 渍前喷施 ICE6 对不同时期小麦干物质积累与转运的影响

由表 4 可知, 相比 CK, 孕穗期和开花期 CW 处理不同程度地降低了成熟期地上部干物质积累量和



开花期至成熟期群体生长率,提高了花前地上部营养器官转运量及比例,差异显著。在孕穗期,与 CW 处理相比,E1W 处理~E4W 处理均可以显著提高小麦成熟期干物质积累量以及花后地上部干物质积累量,E2W 处理~E4W 处理显著提高了开花期至成熟期群体生长率。在开花期,与 CW 处理相比,渍前喷施 ICE6 可以显著提高小麦成熟期干物质积累量、花

后地上部干物质积累量以及开花期至成熟期群体生长率,整体来说孕穗期和开花期分别采用 E3W 处理和 E2W 处理能较好地促进渍后小麦生长发育。说明进行 ICE6 喷施处理可以提高花后光合同化物积累量,提高开花期至成熟期群体生长率,使得成熟期光合同化产物积累量提高,有利于促进向穗部籽粒的转移分配,提高产量。

表 3 渍前喷施不同质量浓度 ICE6 处理对小麦成熟期地上部干物质分配的影响

Table 3 Effects of spraying different concentrations of ICE6 before waterlogging on dry matter distribution of aboveground parts of wheat at maturity stage

时期	处理	小麦成熟期地上部干物质分配					
		茎鞘+叶片 (g, 1 盆)	比例 (%)	穗轴+颖壳 (g, 1 盆)	比例 (%)	籽粒 (g, 1 盆)	比例 (%)
孕穗期	CW	72.02d	49.42a	19.60c	13.45a	54.11d	37.13c
	E1W	73.25cd	47.63b	21.30b	13.85a	59.24c	38.52bc
	E2W	72.60cd	46.22bc	21.75b	13.85a	62.72b	39.93b
	E3W	78.08b	46.91b	22.32b	13.41a	66.05b	39.68b
	E4W	74.48c	46.73b	21.44b	13.45a	63.46b	39.82b
	CK	87.17a	44.63c	23.42a	11.19b	84.73a	43.38a
开花期	CW	75.70d	47.77a	20.75b	13.10a	62.00d	39.13b
	E1W	83.85b	46.51a	22.67a	12.57ab	73.78bc	40.92b
	E2W	86.33a	46.31a	23.26a	12.48ab	76.82b	41.21ab
	E3W	84.23b	46.50a	22.86a	12.62ab	74.05bc	40.88b
	E4W	79.85c	46.92a	20.81b	12.23ab	69.52c	40.85b
	CK	87.17a	44.63b	23.42a	11.99b	84.73a	43.38a

CW、E1W、E2W、E3W、E4W 处理和 CK 见表 2 注。同一时期同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 4 渍前喷施不同质量浓度 ICE6 处理对小麦干物质积累与转运的影响

Table 4 Effects of spraying different concentrations of ICE6 before waterlogging on dry matter accumulation and transport of wheat at different stages

时期	处理	关键时期干物质积累量		花后地上部干物质积累		花前地上部营养器官转运		CGFM [g/(m <sup>2</sup> · d)]
		开花期 (g, 1 盆)	成熟期 (g, 1 盆)	积累量 (g, 1 盆)	CRGY (%)	转运量 (g, 1 盆)	CRGY (%)	
孕穗期	CW	118.48c	145.73d	27.25d	50.36d	26.86a	49.64a	0.83c
	E1W	120.11c	153.79c	33.68c	56.85c	25.56ab	43.15b	1.02bc
	E2W	119.37c	157.07c	37.70bc	60.11b	25.02ab	39.89c	1.14b
	E3W	125.50b	166.45b	40.95b	62.00b	25.10ab	38.00d	1.24b
	E4W	120.81c	159.37bc	38.57bc	60.77b	24.89b	39.23cd	1.17b
	CK	132.82a	195.32a	62.50a	73.77a	22.23c	26.23e	1.89a
开花期	CW	128.35a	158.46d	30.11d	48.56c	31.90a	51.44a	0.91d
	E1W	135.77a	180.30b	44.53bc	60.36b	29.24bc	39.64c	1.35bc
	E2W	136.07a	186.40b	50.33b	65.52ab	26.49d	34.48d	1.53b
	E3W	134.76a	181.13b	46.37bc	62.62ab	27.68cd	37.38c	1.41bc
	E4W	131.05a	170.19c	39.14c	56.30bc	30.38ab	43.70b	1.19c
	CK	132.82a	195.32a	62.50a	73.77a	22.23e	26.23e	1.89a

CW、E1W、E2W、E3W、E4W 处理和 CK 见表 2 注。CRGY、CGFM 分别表示对籽粒产量贡献率、开花期至成熟期群体生长率;同一时期同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.5 不同时期 ICE6 喷施处理下产量与其构成因素之间的相关性分析

对产量及其构成因素进行相关性分析,结果(表 5)表明,孕穗期渍前喷施 ICE6 后穗粒数和千粒质量与产量呈极显著正相关,产量与千粒质量相关系数大于穗粒数,产量与穗数的相关性不显著,说明孕穗期喷施 ICE6 产量提高的主要原因是穗粒数和千粒质量的增加;开花期渍前喷施 ICE6 后产量与穗粒数呈极显著正相关,与千粒质量呈显著正相关,与穗数相关性不显著,说明开花期渍前喷施 ICE6 产量提高主要是因为穗粒数和千粒质量的提高,产量与穗粒数的相关系数大于千粒质量。

## 2.6 不同时期 ICE6 喷施处理下产量与物质积累转运各指标间的相关性分析

对产量及其构成因素进行相关性分析,结果(表 6)表明,孕穗期渍前喷施 ICE6 后,开花期干物质积累量、成熟期干物质积累量、花后干物质积累量与产量均呈显著或极显著正相关,花前贮藏物质转运量与籽粒产量呈极显著负相关。在开花期渍前喷施 ICE6 后,产量与成熟期干物质积累量、花后干物

质积累量、茎鞘+叶片干物质积累以及穗轴+颖壳干物质积累量呈显著或极显著正相关,与花前贮藏物质转运量呈极显著负相关。说明渍后产量恢复应通过着重提高植株花后光合能力,增加成熟期光合同化物质积累量、花后干物质积累量及其占比,以促进其向籽粒的转移分配来实现。

表 5 不同时期 ICE6 喷施处理下产量与其构成因素之间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between yield and its components under ICE6 spraying at different stages

处理时期	指标	相关系数		
		产量	穗数	穗粒数
孕穗期	产量	1.000		
	穗数	0.668	1.000	
	穗粒数	0.935 **	0.529	1.000
	千粒质量	0.978 **	0.789	0.876 *
开花期	产量	1.000		
	穗数	0.683	1.000	
	穗粒数	0.993 **	0.643	1.000
	千粒质量	0.866 *	0.547	0.835 *

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

表 6 不同时期 ICE6 喷施处理下产量与物质积累转运各指标间的相关性分析

Table 6 Correlation analysis between yield and material accumulation and transport indices under ICE6 spraying treatment at different stages

时期	指标	相关系数						
		YD	DF	MF	AF	TF	SL	SG
孕穗期	YD	1.000						
	DF	0.901 *	1.000					
	MF	0.968 **	0.976 **	1.000				
	AF	0.983 **	0.950 **	0.995 **	1.000			
	TF	-0.982 **	-0.892 *	-0.967 **	-0.986 **	1.000		
	SL	0.908 *	0.992 **	0.982 **	0.962 **	-0.909 *	1.000	
	SG	0.675	0.539	0.589	0.603	-0.645	0.469	1.000
	CGFM	0.983 **	0.951 **	0.995 **	1.000 **	-0.986 **	0.963 **	0.600
开花期	YD	1.000						
	DF	0.624	1.000					
	MF	0.990 **	0.722	1.000				
	AF	0.996 **	0.576	0.981 **	1.000			
	TF	-0.962 **	-0.457	-0.938 **	-0.982 **	1.000		
	SL	0.949 **	0.829 *	0.984 **	0.932 **	-0.873 *	1.000	
	SG	0.878 *	0.819 *	0.931 **	0.873 *	-0.839 *	0.954 **	1.000
	CGFM	0.997 **	0.583	0.983 **	1.000 **	-0.981 **	0.936 **	0.875 *

YD、DF、MF、AF、TF、SL、SG、CGFM 分别表示产量、开花期干物质积累量、成熟期干物质积累量、花后干物质积累量、花前贮藏物质转运量、茎鞘+叶片干物质积累量、穗轴+颖壳干物质积累量、开花期至成熟期群体生长率。\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

### 3 讨 论

#### 3.1 二氢卟吩铁对渍水小麦产量及其构成因素的影响

渍害是长江中下游麦区小麦生产中高产稳产的重要制约因素,研究结果表明,渍害会降低小麦株高,抑制植株光合作用及呼吸作用,减弱灌浆后期籽粒的灌浆速率,影响光合产物的积累转运,导致植株生长发育受到限制,最终使得小麦产量降低<sup>[14-16]</sup>,这与本研究结果基本一致,渍水处理的小麦产量显著低于常规种植处理。武文明等<sup>[17]</sup>的研究结果表明,渍水胁迫会显著降低小麦穗粒数和千粒质量,导致产量降低。吴建国等<sup>[18]</sup>研究不同生育期小麦渍水对产量的影响发现,各个生育期淹水均会不同程度地导致小麦穗数、穗粒数、千粒质量等下降,本研究中,孕穗期和开花期渍水均导致穗粒数和千粒质量降低,但穗数无显著变化,可能是因为孕穗期和开花期处理时分蘖数已基本稳定,此时植株正进行穗发育,在该时期进行渍水胁迫会导致小麦生殖生长发育过程受到影响,进而导致穗粒数和千粒质量降低。

在小麦抗渍害研究方面,杜厚江等<sup>[19-21]</sup>的研究结果表明,采用6-苊氨基嘌呤(6-BA)对开花期渍害小麦进行处理发现,渍水前喷施6-BA相比渍水处理显著增产的主要原因是穗粒数和千粒质量的提高,渍水前喷施6-BA可以提高旗叶光合速率及SPAD值,即通过提高小麦光合能力来促进小麦生长发育进而缓解渍水胁迫对产量的不良影响。此外,有研究采用脱落酸(ABA)、芸苔素内酯、 $\gamma$ -氨基丁酸等对不同时期渍水条件的小麦进行喷施处理<sup>[22-24]</sup>,在缓解渍害方面均取得了较好的效果。本研究结果表明,在孕穗期和开花期进行ICE6渍前喷施处理可以提高小麦产量,增产的主要原因是穗粒数和千粒质量的提高,这与前人关于提高小麦抗渍害能力研究的结果基本一致。对产量及其构成因素进行相关性分析的结果表明,处理时期为孕穗期时,产量与千粒质量的相关系数大于穗粒数,而开花期则相反;这可能是由植株自身生物学规律不同导致的,具体原因仍需进一步探究。

#### 3.2 二氢卟吩铁对渍水小麦产量形成的影响

小麦产量形成主要依靠光合作用,叶绿素含量与植株净光合能力显著相关<sup>[25]</sup>,是体现植株光合能力的主要指标之一<sup>[26-31]</sup>,光合能力提高使植株产生更多的光合产物,使得小麦具有较高的地上部干物质积累量进而促进产量提高。在渍水影响小麦光合生产能力方面,Shao等<sup>[32-33]</sup>的研究结果表明,不同

生育期渍水均会导致小麦光合能力下降,使得地上部物质积累量显著降低,最终导致产量降低。赵晓宇等<sup>[21]</sup>和张鹏等<sup>[34]</sup>的研究结果表明,在拔节孕穗期和开花期采用增施氮肥以及喷施外源6-BA等技术措施均可以提高地上部干物质积累量,杜厚江等<sup>[19]</sup>在此基础上进行深入研究,结果表明,喷施6-BA提高了小麦光合能力,促进了成熟期植株地上部干物质积累量的提高及其向籽粒的转移分配,有效降低了渍水对小麦产量的不利影响。本研究结果表明,渍水处理降低了叶绿素含量,喷施ICE6可以提高孕穗期和开花期小麦渍水处理后7~28 d的小麦叶片叶绿素含量;其中孕穗期E2W处理~E4W处理小麦叶片叶绿素含量显著大于CW处理,但低于CK;开花期喷施ICE6,小麦叶片叶绿素含量的变化与孕穗期相似,说明二氢卟吩铁可以提高渍后小麦叶片的叶绿素含量,延缓叶片衰老,有利于减轻小麦植株因渍水胁迫导致叶片发黄以及干枯等早衰现象的发生,促进植株花后光合同化产物的积累与增加,提高植株开花期至成熟期群体生长率,使成熟期光合同化产物积累量显著提高,并提高了籽粒在植株成熟期干物质质量中的分配量及其所占比例,进而使产量提高,这与前人研究结果基本一致。

在植株干物质积累转运方面,多数研究结果表明,小麦花后干物质积累量与籽粒产量呈正相关<sup>[35-36]</sup>;也有研究结果表明,籽粒产量的最终形成是花前营养器官贮藏和花后光合产物积累共同作用的结果<sup>[37]</sup>。在本研究中,相关性分析结果表明,孕穗期渍前喷施ICE6后籽粒产量与开花期干物质积累量、成熟期干物质积累量、花后干物质积累量均呈显著或极显著正相关,与花前贮藏物质转运量呈极显著负相关;开花期渍前喷施ICE6后小麦籽粒产量与成熟期干物质积累量、花后干物质积累量、茎鞘+叶片干物质积累量、穗轴+颖壳干物质积累量呈显著或极显著正相关,与花前干物质转运量呈显著负相关,研究结果存在差异的原因可能是由于区域环境、品种选择、淹水时长等不同导致,还需进行进一步深入探究。整体来说,在本研究中采用ICE6处理可以提高植株花后光合物质生产能力,使植株成熟期光合同化产物积累量、花后干物质积累量及其比例提高,促进了源库关系的协调,有利于光合产物向穗部籽粒的转移分配,最终使成熟期籽粒积累量及比例提高从而使产量得到提高。研究结果表明,在孕穗期和开花期渍水均会导致小麦不同程度的产量下降,在实际生产中,特别是排水不畅的田块,应

密切关注各个时期小麦的渍害问题,及时采用疏通田间沟系以及化学控制、增施肥料等措施进行预防或补救,探索从多途径出发开展小麦防渍减灾工作,以保障粮食生产安全与稳定。

### 参考文献:

- [1] 苗果园,常平凡,刘太廷,等. 中国小麦产业化现状与发展对策初探[J]. 麦类作物学报,2005,25(2):138-140.
- [2] 郝玉柱,张艳玲. 我国小麦在国际竞争中存在问题及对策[J]. 中国商贸,2013(22):153-157.
- [3] 孟丽,乔娟. 我国小麦国际竞争力及其影响因素的国际比较分析[J]. 中国粮食经济,2004(9):26-30.
- [4] 江敏,林聃,孙彬,等. 不同生育期渍水寡照对小麦干物质分配和产量的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2022,43(4):10-21.
- [5] 马尚宇,王艳艳,黄正来,等. 渍水对小麦生长的影响及耐渍栽培技术研究进展[J]. 麦类作物学报,2019,39(7):835-843.
- [6] 吕璞,王小燕. 渍水对小麦生长发育以及产量影响的研究进展[J]. 农村经济与科技,2015,26(5):6-8.
- [7] 吴元奇,李朝苏,樊高琼,等. 渍水对四川小麦生理性状及产量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1162-1170.
- [8] 周瑞雯,唐庆伟,王健生,等. 新型植物生长调节剂0.02%二氢吡吩铁可溶粉剂在水稻上的应用效果初探[J]. 农业开发与装备,2022(10):170-172.
- [9] 郭丽华,唐为爱,李万梅. 0.02%二氢吡吩铁 DP 调节油菜生长的药效试验[J]. 上海蔬菜,2016(2):53-54.
- [10] 邢宇俊,陈黎明,孟东峰,等. 0.02%二氢吡吩铁可溶粉剂在烟草上的应用效果[J]. 江苏农业科学,2020,48(24):91-94.
- [11] 高敬文,苏瑶,沈阿林. 渍害胁迫下小麦生长的响应机理及调控措施研究进展[J]. 应用生态学报,2020,31(12):4321-4330.
- [12] 骆兰平,于振文,王东,等. 土壤水分和种植密度对小麦旗叶光合性能和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2011,37(6):1049-1059.
- [13] 赵辉,戴廷波,姜东,等. 高温下干旱和渍水对冬小麦花后旗叶光合特性和物质转运的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(2):333-338.
- [14] ARAKI H, HAMADA A, HOSSAIN M A, et al. Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling [J]. Field Crops Research, 2012, 137:27-36.
- [15] WU J D, LI J C, WEI F Z, et al. Effects of nitrogen spraying on the post-anthesis stage of winter wheat under waterlogging stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 36(1):207-216.
- [16] 吴建国,刘淑芝,李芳荣,等. 湿害对小麦生长发育及生理影响的研究[J]. 河南农业大学学报,1992,26(1):31-37.
- [17] 武文明,李金才,陈洪俊,等. 氮肥运筹方式对孕穗期受渍小麦穗部结实特性与产量的影响[J]. 作物学报,2011,37(10):1888-1896.
- [18] 吴建国,刘淑芝,李芳荣,等. 湿害对冬小麦生长发育及生理影响的研究[J]. 河南农业大学学报,1992,26(1):31-37.
- [19] 杜厚江,王小燕,赵晓宇. 6-BA 对小麦开花期渍害的缓减效应[J]. 麦类作物学报,2014,34(12):1672-1676.
- [20] 杨笑彦,朱建强. 6-苄氨基腺嘌呤与化肥配施减轻小麦灌浆期渍涝危害[J]. 江苏农业科学,2016,44(7):129-131.
- [21] 赵晓宇,王小燕,柳道明,等. 6-苄氨基腺嘌呤对江汉平原小麦开花后渍害的缓减效应研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(3):518-523.
- [22] 徐笑笑,朱建强,吴启侠. 脱落酸和氮磷钾肥喷施对孕穗期、灌浆期受渍小麦的缓减效应[J]. 作物杂志,2016(6):85-90.
- [23] 郑舒文,徐其隆,邹华文.  $\gamma$ -氨基丁酸对渍水胁迫下小麦产量的影响[J]. 湖北农业科学,2016,55(1):31-33.
- [24] 王贝贝,徐旭,赵艳,等. 植物生长调节剂对花后渍水遮阴小麦籽粒淀粉合成和干物质积累的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(1):9-19.
- [25] 张秋英,李发东,刘孟雨. 冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率变化规律的研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(3):95-98.
- [26] 余若云,杨伟波,朱里,等. 椰林自然遮阴对间作节水抗旱稻光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(22):87-92.
- [27] 乔子纯,贺琰,代红军,等. 外源油菜素内酯对美乐葡萄光合特性和果实品质的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(8):2251-2260.
- [28] 黄保,曹丽茹,王振华,等. 玉米杂交种及其亲本自交系抗旱性综合分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(21):76-82.
- [29] 张垒,李增强,代海芳,等. 纳米氧化锌对花生幼苗生长和光合性能的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(8):2114-2121.
- [30] 郭松,常庆瑞,郑智康,等. 基于无人机高光谱影像的玉米叶绿素含量估测[J]. 江苏农业学报,2022,38(4):976-984.
- [31] 王树凤,王松,舒婉钦,等. 基于光合色素含量和叶绿素荧光参数的杞柳叶片 Cd 积累能力预测[J]. 植物资源与环境学报,2022,31(3):65-74.
- [32] SHAO G C, LAN J J, YU S E, et al. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages [J]. Photosynthetica, 2013, 51(3):429-437.
- [33] 胡继超,曹卫星,姜东,等. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究 I. 干旱和渍水胁迫对光合、蒸腾及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报,2004,30(4):315-320.
- [34] 张鹏,王静静,孙善国,等. 拔节孕穗期渍水及补肥措施对小麦淮麦 28 产量和干物质积累的影响[J]. 浙江农业科学,2021,62(9):1699-1702.
- [35] 王月福,于振文,李尚霞. 土壤肥力和施氮量对小麦氮素吸收运转及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1868-1872.
- [36] 张法全,王小燕,于振文,等. 公顷产 10 000 kg 小麦氮素和干物质积累与分配特性[J]. 作物学报,2009,35(6):1086-1096.
- [37] 孟凡德,马林,石书兵,等. 不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性状的研究[J]. 麦类作物学报,2007,27(4):693-698.

(责任编辑:陈海霞)