

碳点对小麦灌浆期抗渍性的影响

付鹏浩^{1*}, 许文姣², 陈 冷¹, 刘易科¹, 朱展望¹, 佟汉文¹, 张宇庆¹, 王华生³,
高春保¹, 邹 娟^{1#}

¹湖北省农业科学院粮食作物研究所/粮食作物种质创新与遗传改良湖北省重点实验室/农业农村部作物分子育种重点实验室, 湖北 武汉

²武汉安慧生物科技有限公司, 湖北 武汉

³湖北扶轮农业科技开发有限公司, 湖北 襄阳

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月20日; 发布日期: 2024年3月29日

摘 要

目的: 探究不同浓度碳点溶液对小麦灌浆期抗渍性的影响, 为小麦抗逆栽培提供理论指导。方法: 在小麦花后进行10天的渍水胁迫, 渍水结束后设置喷施250倍、500倍和1000倍碳点稀释液和清水4种处理, 以不渍水作为对照。测定花后上部三片叶的叶绿素含量(SPAD)的动态变化, 并测定产量、产量构成因子和成熟期地上部干物质积累量。结果: 小麦花后渍水胁迫导致产量、有效穗数、成熟期地上部干物质积累量、收获指数、上三叶的叶绿素含量显著降低; 渍水后叶面喷施250倍和500倍碳点稀释液可将产量提高到无渍水水平, 主要是因为有效穗数和收获指数有不同程度的提高; 渍水后叶面喷施碳点溶液可以缓解旗叶、倒2叶和倒3叶的叶绿素的降解, 在3个浓度中, 1000倍碳点稀释液效果最好。结论: 喷施碳点溶液可以减少小麦花后渍水胁迫导致的产量损失, 缓解渍水胁迫对小麦的不利影响。

关键词

小麦, 碳点, 渍水胁迫, 产量

Effects of Carbon Dots on the Resistance to Waterlogging during Grain Filling in Wheat

Penghao Fu^{1*}, Wenjiao Xu², Ling Chen¹, Yike Liu¹, Zhanwang Zhu¹, Hanwen Tong¹,
Yuqing Zhang¹, Huasheng Wang³, Chunbao Gao¹, Juan Zou^{1#}

¹Institute of Food Crops, Hubei Academy of Agricultural Sciences/Hubei Key Laboratory of Food Crop Germplasm and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Molecular Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan Hubei

²Wuhan Anhui Biotechnology Co., Ltd., Wuhan Hubei

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 付鹏浩, 许文姣, 陈冷, 刘易科, 朱展望, 佟汉文, 张宇庆, 王华生, 高春保, 邹娟. 碳点对小麦灌浆期抗渍性的影响[J]. 农业科学, 2024, 14(3): 270-277. DOI: 10.12677/hjas.2024.143035

³Hubei Fulun Agricultural Technology Development Co., Ltd., Xiangyang Hubei

Received: Feb. 20th, 2024; accepted: Mar. 20th, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

Objective: To Investigate the effects of carbon dots (CDs) on the resistance to waterlogging in wheat, and provide practical advice for stress-resistance cultivation in wheat. **Methods:** 250 times, 500 times, 1000 times CDs diluent and clean water were sprayed onto wheat canopy after 10-days duration under waterlogging, respectively, and non-waterlogging treatment was used as control (CK). Thereafter, the dynamic changes in chlorophyll content (SPAD) of the top three leaves, yield, yield components, and aboveground dry matter accumulation at maturity were measured. **Results:** Waterlogging during grain filling in wheat resulted in significant decrease in grain yield, effective spikes number, aboveground dry matter accumulation at maturity, harvest index, and chlorophyll content in the top three leaves. Spraying 250 times and 500 carbon dilution solution onto the leaves after waterlogging increased grain yield to the level of CK, which was mainly attributed to the improvement of effective spikes number and harvest index. Carbon dot solution also alleviated the degradation of chlorophyll in flag leaves, top 2nd and 3rd leaves, and 1000 times diluted solution showed the best effect among the three concentrations of carbon dot. **Conclusions:** Spraying carbon dot solution could reduce yield loss caused by waterlogging during grain filling and alleviate the adverse effect of waterlogging in wheat.

Keywords

Wheat, Carbon Dots, Waterlogging, Grain Yield

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

长江中下游麦区小麦单产普遍较低，气象灾害频发是造成这一现状的主要原因[1]，其中渍水是该地区小麦最常见的气象灾害之一，而灌浆期是对渍水胁迫最敏感的时期[2]。灌浆期渍水导致小麦异常早熟，表现为开花后不久叶片加速变黄，灌浆中后期植株突然干枯，灌浆期缩短，籽粒充实不良，千粒重和产量显著降低，严重威胁夏粮丰收[3]。

涝渍通常会导致土壤、植株根部和其他组织严重缺氧[4]，植株从有氧呼吸转变为“低能”的无氧呼吸，从而导致植株能量供应不足，进而抑制根系生长，降低养分和水分的输送能力[5]，并最终导致根系死亡，根茎比降低，地上部氮和碳积累量减少[6]。在温度较高的情况下，即使 1~3 天的短期渍水也会对小麦的生长造成长期的不利影响[7]。渍水造成根对氮的吸收量以及氮从根部到叶片的转运量减少，进而导致叶片黄化加速[6] [8]。植株氮缺乏持续时间过长将不利于渍水后植株的恢复生长和产量的形成，渍害后补施氮肥可一定程度上降低小麦产量损失[9]，通过叶面喷施氮肥可以降低花后渍水导致的小麦粒重下降的幅度[10]。

碳点是一类直径 <10 nm 的具有显著荧光性能的碳纳米材料，碳点具有良好的水溶性和生物相容性，

并且低毒,对环境友好[11]。近年来的研究表明,碳点能促进植物生长、提升农产品品质[12],在农业生产中具有巨大的应用潜力。碳点优良的荧光特性,使其成为植物光合作用过程中电子传递的中间体,从而提高光合电子传递效率,促进植物的光合作用,提高植物的生长速率,同时还能够促进叶绿素的合成和CO₂的固定[13]。有研究表明,碳点可以提高光合作用关键酶 RuBisCO 酶的活性[13],从而加快水稻的生长和生物量的积累[14]。碳点在植物体内被酶水解为植物激素类物质和CO₂,从而调控植物生长或者作为原料参与卡尔文循环合成有机物[15]。

然而碳点在小麦抗逆性方面的作用暂未进行研究。长江中下游小麦在灌浆期经常遭受渍水胁迫,渍水造成植株加速衰老、灌浆期缩短、籽粒充实不良、粒重和产量降低,渍水是该地区小麦单产水平低和品质差的主要原因。碳点可能在提高小麦抗渍性方面同样具有积极的作用,因而探究碳点对小麦抗渍性的影响具有重要意义。

2. 材料方法

2.1. 试验地概况

试验于 2022~2023 年小麦生长季在湖北省襄阳市襄州区伙牌镇姜沟村进行。试验田前茬玉米,秸秆部分还田,秸秆还田量为 15,000 kg/hm²,土壤为棕壤,播种前土壤养分含量见表 1。

Table 1. Soil pH and nutrient content in the experimental field
表 1. 试验田土壤 pH 和养分含量

pH	全氮 (g/kg)	全氮 (g/kg)	铵态氮 (mg/kg)	硝态氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
6.21	0.8	1.1	8.2	8.4	18.3	221.5

播种前施复合肥(N-P₂O₅-K₂O = 24-10-6) 810 kg/hm²作基肥,折合纯 N 194.4 kg/hm²,P₂O₅ 81.0 kg/hm²、K₂O 48.6 kg/hm²,未施追肥。机械宽幅等行距条播,行距 25 cm,播种量 232.5 kg/hm²。试验田按高产管理方式进行,严格进行病、虫、草害防治。

2.2. 试验设计

以小麦品种鄂 T45048 为试验材料,小区试验,每个小区面积 15 m²。共设置 5 个处理,分别为无渍水(CK)、渍水后喷施清水(W-Water)、渍水后喷施 250 倍碳点稀释液(W-250CDs)、渍水后喷施 500 倍碳点稀释液(W-500CDs)、渍水后喷施 1000 倍碳点稀释液(W-1000CDs),每个处理三次重复。为防止小区之间渗水,小区之间构筑田埂并铺设塑料薄膜。渍水处理在开花结束后 6 天进行,连续渍水 10 天,渍水处理保持土壤表面 2 cm 深水层,渍水处理结束后立即排水,并分别将 3000 ml 的清水、250 倍、500 和 1000 倍的碳点稀释液用喷壶均匀喷施到指定小区植株冠层。碳点原液由武汉安慧生物科技有限公司提供。

2.3. 测定项目与方法

2.3.1. 产量和产量构成因子的测定

调查产量、产量构成因子、成熟期地上部干物质积累量和收获指数。成熟期从每个小区中选取具有代表性的 5 m²植株用于测定籽粒产量,产量折算成含水量 13%的单位面积产量;从小区中选取 1 m 长代表性样行连根取出,记录有效穗(单穗籽粒数 ≥5)数,剪除根系后将植株地上部分分为茎叶、颖壳和籽粒三个部分,并分别烘干后称干重,折算成单位面积干重。籽粒经计数、称重后计算每穗粒数和千粒重。

2.3.2. 成穗率的调查

在小麦拔节期前后, 植株不再产生新分蘖时即为最高分蘖期。此时从每个小区中选取 1 m 长代表性样行, 调查分蘖数作为最高分蘖数。有效穗数在成熟期确定。成穗率计算公式如下:

$$\text{成穗率}(\%) = \text{有效穗数} / \text{最高分蘖数} \times 100$$

2.3.3. 叶绿素含量的测定

叶绿素含量用 SPAD 值表示, 用叶绿素仪(SPAD 502)测定。在开花期每个处理选择 6 个开花期一致的单茎标记, 从花后 6 天开始, 每隔 5 天测定标记茎的旗叶、倒 2 叶和倒 3 叶的 SPAD 值, 直至成熟期。每片叶的上中下三点的均值作为该叶的 SPAD 值。

2.4. 数据统计分析

采用 Microsoft excel 2019 软件进行数据整理, 用 Statistix 9.0 软件进行方差分析(ANOVA), 用 LSD 法进行多重比较, 用皮尔逊双尾检验进行相关性分析, 用 SigmaPlot 14.0 软件进行作图。

3. 结果与分析

3.1. 不同处理的产量表现

方差分析表明, 产量、单位面积穗数、每穗粒数和千粒重在不同处理之间具有极显著差异(表 2)。与无渍水相比, 渍水 - 清水处理的产量、有效穗数、地上部干物质积累量和收获指数均显著降低, 四个指标分别降低了 21.4%, 23.8%, 16.0% 和 3.0 个百分点, 穗粒数和千粒重没有显著变化。

Table 2. Grain yield and yield components

表 2. 产量及产量构成

处理	产量 (kg/hm ²)	有效穗数 (×10 ⁴ /hm ²)	每穗 粒数	千粒重 (g)	地上干物质重 (kg/hm ²)	收获指数 (%)
CK	7660 B	488.0 A	40.5 B	33.83 AB	13927 B	47.8 AB
W-Water	6021 C	372.0 C	41.4 B	34.01 AB	11703 C	44.8 CD
W-250CDs	8815 A	516.0 A	46.1 A	32.30 B	15834 A	48.4 A
W-500CDs	7934 B	488.0 A	47.3 A	29.95 C	15152 A	45.5 BC
W-1000CDs	6181 C	416.0 B	37.4 B	34.53 A	12702 C	42.3 D
p 值	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.01	p < 0.01	p < 0.001	p < 0.01

相较于 W-Water 处理, W-250CDs 处理和 W-500CDs 处理产量显著提高, 两者产量分别提高了 2794 kg/hm² (46.4%) 和 1913 kg/hm² (31.8%), W-1000CDs 处理的产量与 W-Water 处理无显著差异。与无渍水处理 CK 相比, W-250CDs 处理产量显著提高了 1155 kg/hm² (15.1%), W-500CDs 处理产量没有显著变化, W-1000CDs 处理的产量显著降低。以上结果表明渍水处理后, 喷施 250 倍和 500 倍碳点稀释液可以将产量提高到无渍水水平。

与 W-Water 处理相比, W-250CDs、W-500CDs 和 W-1000CDs 处理均显著提高了有效穗数, 其中 W-250CDs、W-500CDs 处理的有效穗数提高到了无渍水的水平。W-250CDs 和 W-500CDs 处理之间的每穗粒数无显著差异, 但是两者均显著高于其他 3 个处理。W-500CDs 处理的千粒重显著低于其他处理, 其他处理之间无差异。渍水处理后, 喷施 250 倍和 500 倍碳点稀释液可以显著提高地上部干物质积累量,

喷施 1000 倍稀释液则没有显著效果。喷施 250 倍稀释液同样可以将收获指数提高到无渍水水平，喷施 500 倍和 1000 倍稀释液则效果不显著。

3.2. 不同处理的成穗率

由图 1 可以看出，与对照相比，渍水处理导致成穗率降低 5.8 个百分点，渍水后喷施碳点稀释液提高了成穗率，提升效果随着稀释倍数的增加而降低，250 倍和 500 倍的碳点稀释液可将成穗率提高到对照的水平。

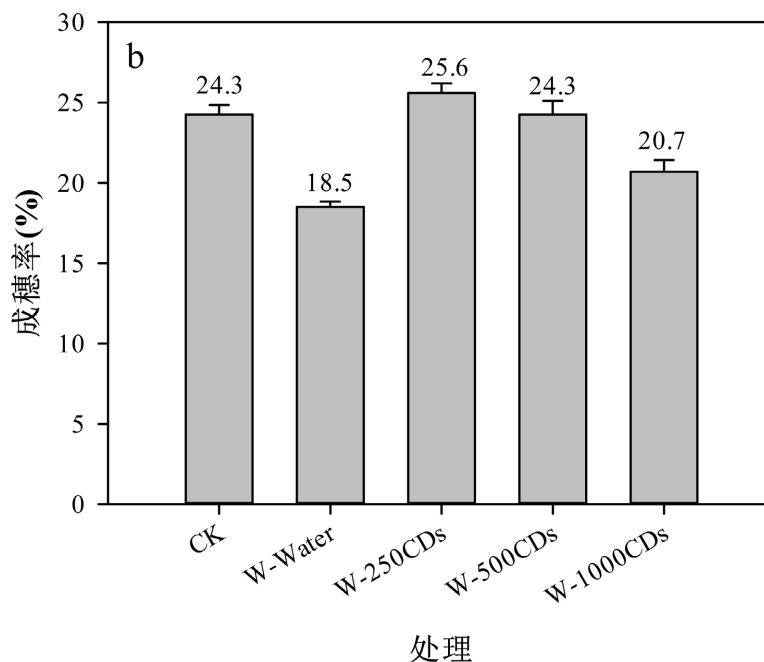


Figure 1. Effective spike percentage of different treatments
图 1. 不同处理的成穗率

3.3. 不同指标之间的关系

相关性分析表明，产量与单位面积穗数、每穗粒数、地上部干物质重和收获指数呈极显著正相关，与千粒重呈显著负相关，地上部干物质重与穗数和每穗粒数显著正相关(表 3)。以上结果说明穗数和穗粒数是影响产量和地上部干物质重的最主要因素。

Table 3. Correlation coefficient between different indicators

表 3. 不同指标之间相关系数

	穗数	每穗粒数	千粒重	地上部干物质重	收获指数
每穗粒数	0.467 ^{ns}	-	-	-	-
千粒重	-0.515 [*]	-0.779 ^{**}	-	-	-
地上部干物质重	0.910 ^{**}	0.686 ^{**}	-0.560 [*]	-	-
收获指数	0.639 [*]	0.600 [*]	-0.331 ^{ns}	0.580 [*]	-
产量	0.910 ^{**}	0.725 ^{**}	-0.530 [*]	0.960 ^{**}	0.784 ^{**}

ns、*和**分别代表相关性不显著、显著($p < 0.05$)和极显著($p < 0.01$)。

3.4. 不同处理的叶绿素含量变化特点

从图2中可以看出,小麦上部3片叶的叶绿素含量变化均呈现出平稳-缓慢降低-迅速降低的变化特点。旗叶和倒2叶叶绿素含量从花后18 d开始降低,花后21 d开始迅速降低;倒3叶则从花后11 d开始降低,花后21 d开始迅速降低。不同处理间比较发现,从花后21 d开始,无渍水处理过的叶绿素含量高于其他处理,表明渍水胁迫加速了叶绿素降解。比较4个渍水处理发现,W-Water处理的旗叶、倒2叶和倒3叶的叶绿素含量分别从花后27 d、花后21 d和花后18 d开始低于喷施碳点稀释液的处理,表明喷施碳点稀释液具有延缓叶绿素降解的效应。总体上来看,不同浓度稀释液的效应大小分别为1000倍稀释 > 500倍稀释 > 250倍稀释。

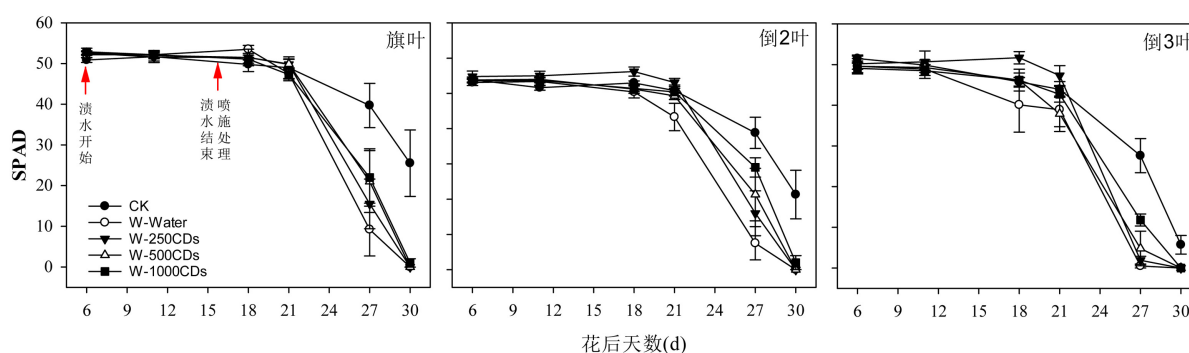


Figure 2. Changes in chlorophyll content (SPAD) of the top three leaves

图2. 不同处理下小麦花后叶片上三叶叶绿素含量(SPAD)变化

4. 讨论

从本研究的结果来看,小麦在灌浆期渍水后产量显著降低,喷施碳点稀释液后产量显著提高,而有效穗数、每穗粒数、地上部干物质重和收获指数增加是导致产量增加的原因。以下分别从上面几个因素分析讨论其对产量的影响。

有研究指出,开花后渍水对产量的影响最大,因而认为花后是对渍害最敏感的时期[2]。花后渍水可以导致产量降低40%以上,其中穗数、穗粒数和千粒重均会因渍水而降低[16][17],而千粒重降低是造成产量降低的主要原因[3]。本研究中,花后渍水导致产量降低21.4%,而导致产量降低的主要原因是有效穗降低,这与前人研究有所不同。考虑到单位面积穗数在开花后基本不再变化,并且本研究中的处理是在花后进行,不同处理之间的单位面积穗数理应差别不大。但是如果当群体中发育晚、穗型小的弱势穗处于渍水胁迫条件下时,弱势穗上的籽粒发育将受到影响,穗粒数降低[18],穗粒数不足5粒时,该穗将被视为无效穗,结果将会导致有效穗数降低。本研究中,与渍水处理相比,喷施250倍和500倍碳点稀释液处理的有效穗数和穗粒数增加,可能是因为喷施碳点溶液改善了渍水胁迫下籽粒发育不良的状况,使得有效穗数和穗粒数受渍水胁迫不利影响变小,但是1000倍碳点稀释液处理只能将有效穗数恢复到无渍水处理的85.2%,表明碳点对小麦生长的促进作用可能存在一个最佳浓度范围。

花后叶片光合产物是小麦籽粒灌浆最主要的物质来源之一,然而花后渍水通常导致叶片叶绿素含量(SPAD值)、净光合速率[18]和干物质积累量降低,并抑制了茎鞘中非结构性碳水化合物向籽粒中的转运,使得灌浆期缩短和灌浆后期的灌浆速率降低,最终导致千粒重降低[19]。有研究指出,渍水后叶面喷施尿素可以提高叶绿素含量,维持更久的光合面积,从而缓解渍水造成的产量损失[20]。本研究中,喷施碳点稀释液同样可以起到缓解花后叶片叶绿素降解,延长叶片持绿期,增加地上部干物质积累,弥补产量损失的作用。然而本研究中千粒重并没有增加,500倍碳点稀释液处理的千粒重反而降低,可能是因为每

穗粒数和千粒重之间相互制约导致, 本研究中每穗粒数和千粒重之间的显著负相关关系证明了这一点。

5. 结论

碳点具有优异的荧光性能和环境友好性, 碳点对作物生长和品质的影响是近年研究热点之一。本研究从碳点增强作物抗逆性角度出发, 探索碳点对小麦花后抗渍性的影响。研究结果表明: 1) 喷施碳点稀释液延缓了渍水引起的小麦上部三片叶的叶绿素的降解, 延长了小麦叶片的持绿期, 效应大小为 1000 倍稀释 >500 倍稀释 >250 倍稀释。2) 花后喷施碳点稀释液可以提高有效穗数、每穗粒数和地上部干物质积累量, 从而导致产量增加。3) 喷施 250 倍和 500 倍碳点稀释液可以将产量提高到无渍水水平, 缓解了小麦花后渍水胁迫对小麦减产的不利影响, 具有类似叶面肥或者生长调节剂的功能。

致 谢

本研究得到武汉安慧生物科技有限公司为和湖北扶轮农业科技开发有限公司的支持, 在此表示感谢。

基金项目

湖北省农业科学院青年科学基金(2023NKYJJ05)。

参考文献

- [1] 王小燕, 高春保, 熊勤学, 等. 江汉平原小麦生产面临的挑战及对策[J]. 作物杂志, 2013(3): 17-20.
- [2] Araki, H., Hossain, M. and Takahashi, T. (2012) Waterlogging and Hypoxia Have Permanent Effects on Wheat Root Growth and Respiration. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **198**, 264-275. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00510.x>
- [3] Hossain, M.A., Araki, H. and Takahashi, T. (2011) Poor Grain Filling Induced by Waterlogging Is Similar to That in Abnormal Early Ripening in Wheat in Western Japan. *Field Crops Research*, **123**, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.005>
- [4] Kotula, L., Clode, P.L., Striker, G.G., et al. (2015) Oxygen Deficiency and Salinity Affect Cell-Specific Concentrations in Adventitious Roots of Barley (*Hordeum vulgare*). *New Phytologist*, **208**, 1114-1125. <https://doi.org/10.1111/nph.13535>
- [5] Colmer, T.D. and Voesenek, L.A.C.J. (2009) Flooding Tolerance: Suites of Plant Traits in Variable Environments. *Functional Plant Biology*, **36**, 665-681. <https://doi.org/10.1071/FP09144>
- [6] Jiang, D., Fan, X., Dai, T., et al. (2008) Nitrogen Fertiliser Rate and Post-Anthesis Waterlogging Effects on Carbohydrate and Nitrogen Dynamics in Wheat. *Plant and Soil*, **304**, 301-314. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9556-x>
- [7] Malik, A.I., Colmer, T.D., Lambers, H., et al. (2002) Short-Term Waterlogging Has Long-Term Effects on the Growth and Physiology of Wheat. *New Phytologist*, **153**, 225-236. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00318.x>
- [8] Herzog, M., Striker, G.G., Colmer, T.D., et al. (2016) Mechanisms of Waterlogging Tolerance in Wheat—A Review of Root and Shoot Physiology. *Plant, Cell & Environment*, **39**, 1068-1086. <https://doi.org/10.1111/pce.12676>
- [9] Robertson, D., Zhang, H., Palta, J.A., et al. (2009) Waterlogging Affects the Growth, Development of Tillers, and Yield of Wheat through a Severe, but Transient, N Deficiency. *Crop and Pasture Science*, **60**, 578-586. <https://doi.org/10.1071/CP08440>
- [10] Wu, J., Li, J., Wei, F., et al. (2014) Effects of Nitrogen Spraying on the Post-Anthesis Stage of Winter Wheat under Waterlogging Stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, **36**, 207-216. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1401-z>
- [11] Ghosal, K. and Ghosh, A. (2019) Carbon Dots: The Next Generation Platform for Biomedical Applications. *Materials Science and Engineering: C*, **96**, 887-903. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.11.060>
- [12] Li, Y., Xu, X., Wu, Y., et al. (2020) A Review on the Effects of Carbon Dots in Plant Systems. *Materials Chemistry Frontiers*, **4**, 437-448. <https://doi.org/10.1039/C9QM00614A>
- [13] Wang, H., Zhang, M., Song, Y., et al. (2018) Carbon Dots Promote the Growth and Photosynthesis of Mung Bean Sprouts. *Carbon*, **136**, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.051>
- [14] Li, H., Huang, J., Lu, F., et al. (2018) Impacts of Carbon Dots on Rice Plants Boosting the Growth and Improving the Disease Resistance. *ACS Applied Bio Materials*, **1**, 663-672. <https://doi.org/10.1021/acsabm.8b00345>

-
- [15] Li, H., Huang, J., Liu, Y., *et al.* (2019) Enhanced RuBisCO Activity and Promoted Dicotyledons Growth with Degradable Carbon Dots. *Nano Research*, **12**, 1585-1593. <https://doi.org/10.1007/s12274-019-2397-5>
- [16] Arata, A.F., Dinolfo, M.I., Martinez, M., *et al.* (2019) Effects of Waterlogging during Grain Filling on Yield Components, Nitrogen Uptake and Grain Quality in Bread Wheat. *Cereal Research Communications*, **47**, 42-52. <https://doi.org/10.1556/0806.46.2018.058>
- [17] 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(1): 31-37.
- [18] 吴进东, 李金才, 魏凤珍, 等. 花后渍水高温交互效应对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1071-1079.
- [19] 吴启侠, 谭京红, 朱建强, 等. 花后渍水对不同耐渍型冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 74-81.
- [20] 梁鹏, 郭德胜, 刘德峻, 等. 拔节期渍水后施用尿素对小麦产量和光合物质生产的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 202-209.