

万 倩, 曹宏鑫, 葛道阔, 等. 不同施肥量下花期渍水胁迫对油菜籽粒充实过程的定量影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1144-1153.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.011

不同施肥量下花期渍水胁迫对油菜籽粒充实过程的定量影响

万 倩^{1,2}, 曹宏鑫¹, 葛道阔¹, 张文宇¹, 张伟欣¹, 葛思俊¹, 张 迁¹, 江留昊¹

(1. 江苏省农业科学院农业信息研究所, 江苏 南京 210014; 2. 南京农业大学农学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 为更好地研究油菜生长发育及产量受渍害影响的程度, 以宁油 22(常规品种, C1) 和宁杂 1818(杂交品种, C2) 为试验材料, 以 2017–2019 年两季油菜不同施肥量 (N0 和 N1) 以及花期渍水持续时间 (0 d、3 d、6 d 和 9 d) 桶栽与池栽试验为基础, 以油菜生长发育及产量形成为主要研究对象, 系统研究了不同施肥条件下花期不同渍水持续时间胁迫对油菜籽粒充实过程的定量影响。结果表明, 桶栽和池栽条件下, 不同施肥、渍水持续时间处理对油菜籽粒充实的影响具有共同趋势, 籽粒快速增长期一般在开花后 10~25 d, 但不同品种、施肥、渍水持续时间处理间存在差异; 用渍害影响因子 (*WIF*) 和 Logistic 方程参数 *a* 定量了不同品种、施肥与渍水持续时间对油菜籽粒充实过程的影响, 两者均能识别不同条件下的影响程度大小, 渍水持续 6 d 和 9 d 的 *WIF* 最大, Logistic 方程可较好地模拟不同品种、施肥、渍水持续时间处理下油菜单角果增质量随花后天数的变化过程。同时, 建立了不同施肥条件下花后渍水时油菜籽粒充实速率统一模型, 检验结果表明, 两个品种单角果质量实测值与模拟值的平均绝对误差为 0.021 4~0.019 0 g, *RMSE* 均为 0.026 g, 相关系数为 0.970~0.976 ($P<0.001$), 表明效果较好。

关键词: 油菜; 施肥量; 渍水持续时间; 籽粒充实过程; 渍害影响因子

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)05-1144-10

Quantitative effects of waterlogging stress at florescence stage on the grain filling process of rape under different fertilization amounts

WAN Qian^{1,2}, CAO Hong-xin¹, GE Dao-kuo¹, ZHANG Wen-yu¹, ZHANG Wei-xin¹, GE Si-jun¹, ZHANG Qian¹, JIANG Liu-hao¹

(1. Institute of Agricultural Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To better study the influence degree of waterlogging damage on the growth and yield of rape, the quantitative effects of different waterlogging duration stress at florescence on grain filling process of rape under different fertilization conditions were systematically researched, Ningyou 22 (conventional variety, C1) and Ningza 1818 (hybrid variety,

C2) were used as the test materials, the bucket cultivation and pond cultivation tests with different fertilization amounts (N0 and N1) and waterlogging duration of the flowering stage (0 d, 3 d, 6 d and 9 d) during the two seasons of rape in 2017–2019 were used as the experimental basis, the growth and yield formation of rape were taken as the main research objects. The results showed that, under the conditions of bucket cultivation and pond

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31201127, 31471415, 31601223, 31871522); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(19)2040]; 江苏省农业科学院基金项目 (6111648, 6111645)

作者简介: 万 倩 (1995-), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为作物系统模拟。 (Tel) 13611507966; (E-mail) 2398675825@qq.com

通讯作者: 曹宏鑫, (E-mail) caohongxin@hotmail.com

cultivation, the effects of different fertilization and waterlogging duration treatments on the grain filling process of rape showed the same trends, the rapid growth period of grains (*SPW*) was in 10–25 d of flowering, but there were differences between different treatments of cultivars, fertilization and waterlogging duration. Waterlogging impact factor (*WIF*) and parameter *a* of the Logistic equations were used to quantify the effects of different cultivars, fertilization and waterlogging duration on the grain filling process of rape, it was found that they could all recognize the effect degree under different conditions, and the max *WIF* appeared when the waterlogging duration was 6 d or 9 d. Logistic equations could well simulate the changes of the *SPW* increase with the days after flowering of rape under different cultivars, fertilization and waterlogging duration treatments. In the same time, a general model for the grain filling rate of rape during the waterlogging period after flowering under different fertilization conditions was developed. The verification results showed that the average absolute errors between the observed values and the simulated values of *SPW* in two varieties were 0.021 4–0.019 0 g, the root mean square error (*RMSE*) was 0.026 g, the correlation coefficient was 0.970–0.976 ($P<0.001$), which showed good effects.

Key words: rape; fertilization amount; waterlogging duration; grain filling process; waterlogging impact factor (*WIF*)

油菜是中国播种面积最大的油料作物^[1],常年种植面积 $(6.00\sim7.00)\times10^6\text{ hm}^2$,总产量 $(1.000\sim1.300)\times10^7\text{ t}$,分别约占世界油菜常年种植面积与总产量的1/3和1/5^[2],其中,长江流域是中国种植面积最大的油菜产业带之一。由于长江流域秋季和春季湿润多雨,土壤黏重、地下水位高、排水困难,土壤表面易积水,使油菜在生长关键时期(苗期和花期)常易遭受渍害,导致减产严重^[3-4],因此,渍害成为长江流域油菜产区重大农业气象灾害之一^[5]。研究渍害对油菜生长及产量的影响,对油菜防渍减灾具有重要意义。

近年来,国内外关于渍害对油菜生长及产量的影响研究主要集中在不同阶段与渍害持续天数对油菜开花结实和角果发育^[6]、产量及生理特性^[7]、生长和养分积累^[8-9]、一次分枝数与有效角果数^[10]以及种子质量及含油量^[11]的影响等方面。比如,花果期持续渍害导致开花结实和角果发育受阻,干瘪变黄、衰老加速,有效角果数减少,千粒质量降低,产量下降^[6]。Zhou等^[7]研究结果表明,出苗及现蕾阶段渍害显著降低单株一次分枝数、单株角数及角粒数,产量分别减少21.3%和12.5%。Wollmer等^[8]试验结果表明油菜品种BBCH 31渍水处理产量降低,是因为油菜的生长和养分积累受到影响;BBCH 55渍水处理虽然严重损害了主轴花序,但是对次生总花序的影响较小,挽回了部分产量损失。Xu等^[9]研究结果表明,除分枝数外,各形态性状的耐涝系数均与产量显著正相关,但是种子质量与产量没有显著相关。刘凯文等^[10]开展了不同时期多个受渍天数水平的渍害试验,结果表明蕾薹期受渍害,一次分枝数明显减少,有效角果数减少不明显,单株有效角果率下降较明显;开花期和角果期受渍害,一次分枝减少

不显著,但受渍9 d以上,有效角果数比对照极显著减少。张文英等^[11]研究认为油菜花果期持续受渍对产量形成影响显著,但对含油量影响较小。在盆栽试验条件下冬季渍水主要影响单株角果数,春季渍水降低种子质量及含油量^[11-12]。

在增施氮肥与渍水胁迫对油菜生长及产量的影响方面,已有研究结果表明合理增施氮肥可有效缓解渍水胁迫对油菜造成的不利影响,同时增加产量^[13]。邹娟等^[14]研究认为,增施磷、钾肥可增强油菜抗薹期渍水能力,降低减产幅度。刘波等^[15]研究证明渍水胁迫下,高氮量处理的各时期干物质质量和氮素累积量的下降幅度显著低于中、低氮量处理;在合适范围内施用氮肥可显著提高油菜产量。氮高效基因型品种比氮低效基因型品种在渍水胁迫下更易于氮素转运^[16]。

在渍水胁迫对油菜生长及产量的定量影响方面,曹宏鑫等^[2]提出了渍害影响因子,定量了花期渍水胁迫对油菜生长及产量的影响^[3]。刘凯文等^[10]利用相对渍害指数、相对产量、渍害日变率及渍害损失贡献率定量研究了春季渍害对油菜产量结构的影响与减产效应。Li等^[17-18]研究了用于预测耐渍性的不同指标的一致性。

综上所述,关于不同施肥与渍水胁迫对油菜生长及产量的影响前人已有较多研究,但是渍水胁迫对油菜生长及产量的定量影响,特别是花期渍水胁迫对油菜籽粒充实过程的定量影响还鲜有报道。本研究旨在通过分析油菜籽粒充实过程对不同施肥量下渍水胁迫响应,定量不同施肥量下花期渍水胁迫对油菜籽粒充实过程的影响,以期揭示不同施肥与渍水胁迫对油菜生长及产量的影响进而制定应对

措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试油菜品种为宁油 22(常规品种,C1)和宁杂 1818(杂交品种,C2),均由江苏省农业科学院经济作物研究所育成。

1.2 试验设计

品种、施肥和渍水控制试验(分池栽与桶栽)分别于2017-2018和2018-2019年在江苏省农业科学院试验田(32.03°N, 118.87°E)进行,供试品种为宁油 22(C1)和宁杂 1818(C2)。池栽前茬为休闲,土壤为江苏省农业科学院试验大田黄棕壤,含有机质 31.4 g/kg,全氮 2.03 g/kg,速效磷 20.3 mg/kg,速效钾 139.0 mg/kg,pH 7.31。2017-2018 和2018-2019 年分别于 10 月 3 日和 10 月 2 日播种,11 月 2 日和 11 月 1 日移栽。其中,桶栽试验的桶高 30 cm,直径 30 cm,内装 80%土壤(来自上述试验大田,其养分状况同上),每桶移栽 2 株,选择生长状况较好的 1 株作为试验材料;池栽单苗移栽,1 hm² 1.2×10⁵株(行距 40 cm,株距 20 cm),小区面积3.77 m×2.77 m≈10.44 m²。

试验设品种、施肥和渍水持续时间 3 个因子,其中,品种设 C1、C2 2 个水平,施肥设 N0(不施肥)、N1(正常施肥;N 0.018 kg/m², P₂O₅ 0.012 kg/m², K₂O 0.018 kg/m²) 2 个水平,渍水持续时间设 0 d(CK)、3 d(W1)、6 d(W2)、9 d(W3,仅用于桶栽)。施肥区(含池栽与桶栽)氮肥按基肥:腊肥:薹肥=5:3:2 分配;磷、钾肥全部基施,均于初花期(2017-2018 年为 3 月 13 和 19 日;2018-2019 年为 3 月 17 和 20 日)进行渍水处理,其余管理同高产大田。

桶栽试验采用三因素随机区组设计,共 16 个处理,每处理栽 13 桶,共 208 桶。按设计渍水持续时间 0 d(CK)、3 d(W1)、6 d(W2)、9 d(W3)将桶置于 1 m 深水泥池内进行渍水处理,保持水面没过桶内土壤 5 cm,渍水后取出放置于遮雨棚正常管理。

池栽试验采用裂区设计,施肥为主区,品种和渍水持续时间为副区,共 12 个处理,重复 3 次,主、副区均随机排列。按设计渍水持续时间 0 d(CK)、3 d(W1)、6 d(W2)采用人工灌溉补水方法进行渍水处理,使渍水小区土壤湿度在渍水持续时间内保持 95%以上。小区四周为水泥池并设有防水膜,入土

深度约 80 cm,能够有效防止水分横向渗透。渍水处理期间备有遮雨设施,在遇到降雨天气时使用。

1.3 测定项目与方法

在油菜初花后开始结果时,平均每 7 d 取一次样,池栽取 3 株,桶栽取 2 株,每次每株取角果 30 个,分别取植株主轴基部 20 个、2 个第 1 分枝基部各 5 个,将取下的角果放入塑封袋,先测定鲜质量,而后将角果置烘箱 105 ℃杀青 0.5 h,再 80 ℃烘至恒质量取出,测定其干物质质量。通过相邻两次单角果质量增量除以时间计算出籽粒充实速率。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel.2016 进行数据处理,利用 Curve Expert 1.4 和 Spss2016 与南京农业大学 2017 统计分析软件进行数据处理。

1.4.1 单角果质量渍害影响因子(WIF)计算方法

$WIF=1-WTi/WCi$,式中,WTi 为渍害处理单角果质量(g),WCi 为相同施肥量下无渍水对照单角果质量(g)。

1.4.2 模型检验方法 利用根均方差 RMSE 和平均绝对误差(d_a)对模型精度进行检验^[18]。同时绘制观测值与模拟值 1:1 的关系图直观显示模型精度和可靠性。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{si})^2}{n-1}}$$

$$d_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{si})$$

其中, i 为样本数, X_{oi} 为观测值, X_{si} 为模拟值, n 为样本容量。

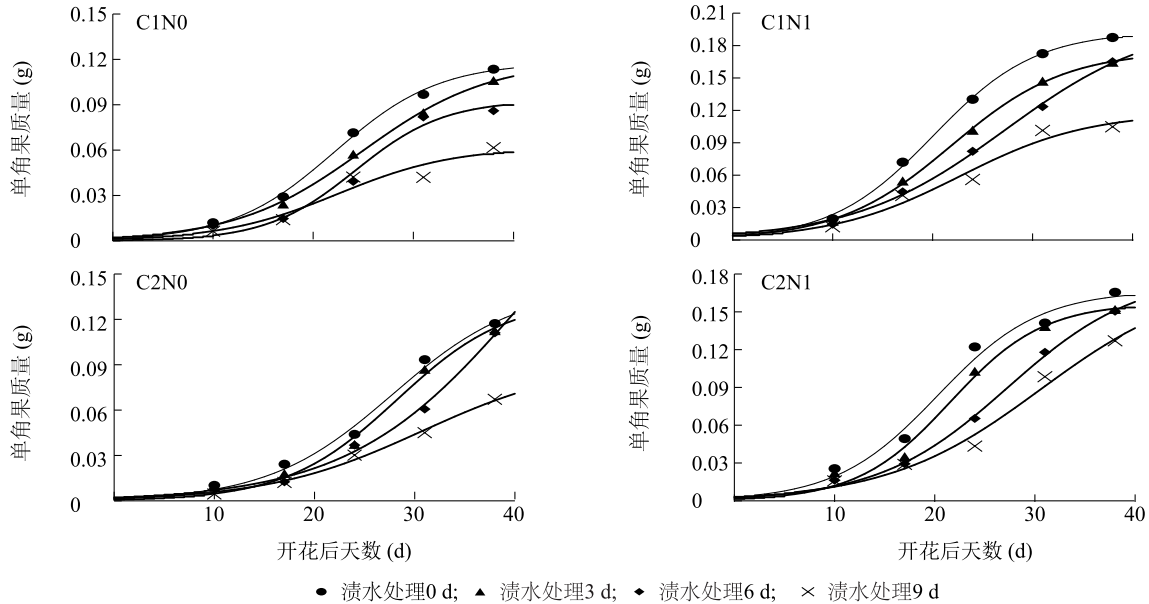
2 结果与分析

2.1 桶栽条件下渍水处理对油菜籽粒充实过程的影响

图 1 是桶栽时两品种在不施肥与施肥条件下不同渍水持续时间对油菜籽粒充实过程的影响。从图 1 可见,随花后时间延长,油菜籽粒充实经历了“慢-快-慢”变化过程,快速增长期为开花后 10~25 d,越接近成熟期单角果增质量越慢,开花后 10~30 d 为主要籽粒充实期。与不渍水(对照)相比,随渍水持续时间延长,单角果增质量明显下降;在相同渍水持续时间,两品种在施肥条件下同一时间段内单角果质量明显高于不施肥处理。两品种渍水持续时间 0 d 和 3 d 处理油菜单角果增质量加快多数从花后第

10 d 开始,渍水持续时间 6 d 和 9 d 处理油菜籽粒单

角果增质量加快多数从花后第 20 d 左右开始。



C1N0: 宁油 22 不施肥; C1N1: 宁油 22 施肥; C2N0: 宁杂 1818 不施肥; C2N1: 宁杂 1818 施肥。

图 1 不同施肥量下花期不同渍水持续时间处理对油菜籽粒充实过程的影响(桶栽)

Fig.1 Effects of different waterlogging duration treatments at florescence stage on grain filling of rape seeds under different fertilization amounts (bucket cultivation)

为了定量表达这一变化过程,以花后天数(d)为自变量,单角果质量(W)为因变量,采用 Logistic 方程对桶栽油菜籽粒充实增质量过程进行拟合,方程如下:

$$W = \frac{a}{1 + be^{-cd}} \quad (1)$$

式(1)中 a 、 b 、 c 为方程参数,不同品种、施肥量与渍水持续时间下各参数值及方程统计量见表 1。

表 1 不同品种、施肥、渍水持续时间处理下油菜籽粒充实单角果质量动态 Logistic 方程参数(桶栽)

Table 1 Parameters of the Logistic equation of the single pod weight variations in the grain filling process of rape under different treatments of varieties, fertilization and waterlogging duration(bucket cultivation)

品种	施肥	渍水持续时间 (d)	a	不渍水 a / 渍水 a	b	c	相关系数 (r)	决定系数 (R^2)	相关系数显著性 阈值 (Sig)
宁油 22 (C1)	不施肥 (N0)	0	0.118		72.1	0.193	0.998 2 ***	0.996	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		3	0.009	13.1	51.5	0.158	0.998 9 ***	0.998	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		6	0.093	1.3	237.8	0.226	0.988 1 **	0.976	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$
		9	0.062	1.9	47.5	0.172	0.964 4 *	0.930	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$
	施肥 (N1)	0	0.193		51.0	0.196	0.999 2 ***	0.998	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		3	0.175	1.1	47.1	0.176	0.999 4 ***	0.999	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		6	0.204	0.9	35.6	0.131	0.998 8 ***	0.998	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		9	0.118	1.6	34.6	0.156	0.983 4 **	0.967	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$
宁杂 1818 (C2)	不施肥 (N0)	0	0.141		88.0	0.161	0.995 9 ***	0.992	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		3	0.134	1.1	166.3	0.181	0.995 8 ***	0.992	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		6	0.262	0.5	113.5	0.116	0.997 6 ***	0.995	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$
		9	0.092	1.5	54.1	0.130	0.997 1 ***	0.994	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
	施肥 (N1)	0	0.167		54.4	0.197	0.990 5 **	0.981	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$
		3	0.157	1.1	105.2	0.216	0.993 5 **	0.987	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$
		6	0.180	0.9	68.5	0.155	0.998 6 ***	0.997	$r_{((3, 0.001))} = 0.991$
		9	0.177	0.9	54.9	0.131	0.989 5 **	0.979	$r_{(3, 0.005)} = 0.974$

a 、 b 、 c 为方程参数。

从表 1 中可以看出其决定系数 R^2 都在 0.90 以上,说明 Logistic 方程能较好地拟合不同品种、施肥量与渍水持续时间处理下油菜籽粒充实过程。其中,参数 a 的生理意义是指油菜籽粒充实单角果质量的最大值, $a/(1+b)$ 是指油菜籽粒充实单角果质量的起始值, $-\ln(\frac{1}{b})/c$ 是指油菜籽粒充实单角果质量由缓慢增长到快速增长的拐点。

由方程参数变化可见,在参数 b 、 c 一定时,不施肥条件下宁油 22 在渍水持续 3 d 时其参数 a 减小 13.1 倍,幅度较大,而宁杂 1818 则在渍水 9 d 时参数 a 减小 1.5 倍,幅度较大;施肥条件下宁油 22 在渍水 9 d 时其参数 a 减小 1.9 倍,幅度较大,而宁杂 1818 参数 a 随渍水持续时间延长基本不减小。可见参数 a 值在一定程度上反映了不同品种籽粒充实过程对不同施肥量与渍水时间的响应差别。

不同施肥量下花期不同渍水持续时间处理对油菜籽粒充实的影响因子见表 2。由表 2 可知,桶栽

时宁油 22 不施肥条件下渍水持续 3 d、6 d 和 9 d 处理的籽粒充实渍害影响因子 (WIF) 范围分别为 0~-0.20、-0.15~-0.50 和 -0.46~-0.57,施肥条件下则分别为 -0.12~-0.24、-0.12~-0.38 和 -0.38~-0.57。无论施肥与否,均为渍水持续 9 d 处理的 WIF 最大,但不施肥时渍水持续 9 d 后单角果质量随生长期延长无显著变化,说明不施肥长时间渍水使油菜籽粒充实受到难以恢复的影响。在各处理条件下渍水对籽粒充实的影响集中在花后第 17~31 d。宁杂 1818 在不施肥条件下渍水持续 3 d、6 d 和 9 d 处理的 WIF 范围分别为 -0.04~-0.25、-0.05~-0.48 和 -0.31~-0.56,施肥条件下则分别为 -0.02~-0.29、-0.09~-0.47 和 -0.23~-0.64。无论施肥与否,均为渍水持续 9 d 处理 WIF 最大,同样,不施肥时渍水持续 9 d 后单角果质量随生长期延长基本无显著变化,即长时间渍水使油菜籽粒充实受到难以恢复的影响。在各处理条件下渍水对籽粒充实的影响集中在花后第 17~31 d。

表 2 不同施肥量下花期不同渍水持续时间处理对油菜籽粒充实渍害影响因子 (WIF) 的影响 (桶栽)

Table 2 Effects of different waterlogging duration treatments at florescence stage on waterlogging impact factors (WIF) during rape grain filling process under different fertilization amounts (bucket cultivation)

施肥	渍水持续时间 (d)	花后天数 (d)	单角果质量 (g)				渍水影响因子 (WIF)			
			桶栽		池栽		桶栽		池栽	
			宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)	宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)	宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)	宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)
不施肥 (N0)	0	10	0.012b	0.010c	0.019c	0.015c				
		17	0.029b	0.024bc	0.046c	0.03bc				
		24	0.072a	0.044bc	0.089bc	0.053bc				
		31	0.097a	0.093ab	0.149ab	0.093ab				
		38	0.114a	0.117a	0.163a	0.148a				
	3	10	0.012e	0.009d	0.012d	0.013c	0	-0.11	-0.37	-0.13
		17	0.024d	0.018cd	0.042cd	0.020c	-0.17	-0.25	-0.09	-0.33
		24	0.057c	0.037d	0.081bc	0.062bc	-0.20	-0.15	-0.09	-0.15
		31	0.085b	0.087b	0.131ab	0.08ab	-0.12	-0.07	-0.12	-0.14
		38	0.106a	0.113a	0.150a	0.122a	-0.07	-0.04	-0.08	-0.12
	6	10	0.010c	0.008d	0.011c	0.009d	-0.16	-0.22	-0.42	-0.40
		17	0.015bc	0.013d	0.031c	0.013d	-0.50	-0.48	-0.33	-0.57
		24	0.039ab	0.037c	0.059bc	0.037c	-0.45	-0.16	-0.34	-0.30
		31	0.082ab	0.061b	0.101ab	0.061b	-0.15	-0.35	-0.32	-0.34
		38	0.086a	0.111a	0.13a	0.117a	-0.25	-0.05	-0.20	-0.15
	9	10	0.006a	0.005b			-0.47	-0.56		
		17	0.014a	0.012b			-0.52	-0.50		

续表 2 Continued 2

施肥	渍水持续时间 (d)	花后天数 (d)	单角果质量 (g)				渍水影响因子 (WIF)			
			桶栽		池栽		桶栽		池栽	
			宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)	宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)	宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)	宁油 22 (C1)	宁杂 1818 (C2)
施肥 (N1)	0	24	0.042a	0.030ab			-0.41	-0.31		
		31	0.042a	0.045ab			-0.57	-0.52		
		38	0.062a	0.067a			-0.46	-0.43		
		10	0.020d	0.026d	0.012c	0.026b				
		17	0.072c	0.049c	0.029c	0.049b				
		24	0.130b	0.122b	0.081b	0.071b				
		31	0.173a	0.141b	0.104ab	0.135a				
		38	0.188a	0.166a	0.129a	0.166a				
	3	10	0.017d	0.022b	0.012d	0.018c	-0.12	-0.13	0	-0.31
		17	0.055c	0.035ab	0.024cd	0.038c	-0.24	-0.29	-0.17	-0.22
		24	0.102b	0.103ab	0.055bc	0.067bc	-0.22	-0.16	-0.32	-0.06
		31	0.147a	0.138ab	0.096ab	0.131ab	-0.15	-0.02	-0.08	-0.03
		38	0.165a	0.152a	0.098a	0.158a	-0.12	-0.08	-0.25	-0.05
		6	0.015d	0.016c	0.01c	0.016c	-0.25	-0.36	-0.17	-0.38
	6	17	0.045d	0.029c	0.015c	0.029c	-0.38	-0.41	-0.48	-0.41
		24	0.082c	0.065bc	0.055b	0.065bc	-0.37	-0.47	-0.32	-0.08
		31	0.124b	0.118ab	0.082a	0.118ab	-0.28	-0.16	-0.21	-0.08
		38	0.165a	0.150a	0.086a	0.150a	-0.12	-0.09	-0.33	-0.10
	9	10	0.012b	0.016d			-0.38	-0.38		
		17	0.041b	0.029cd			-0.43	-0.41		
		24	0.056ab	0.043c			-0.57	-0.64		
		31	0.101a	0.099b			-0.41	-0.30		
		38	0.105a	0.127a			-0.44	-0.23		

综上所述,桶栽条件下渍水持续时间对两品种籽粒充实均有不同程度影响,其中施肥比不施肥对照更具耐渍性,而宁杂 1818 比宁油 22 耐渍性更好。

2.2 池栽条件下渍水处理对油菜籽粒充实过程的影响

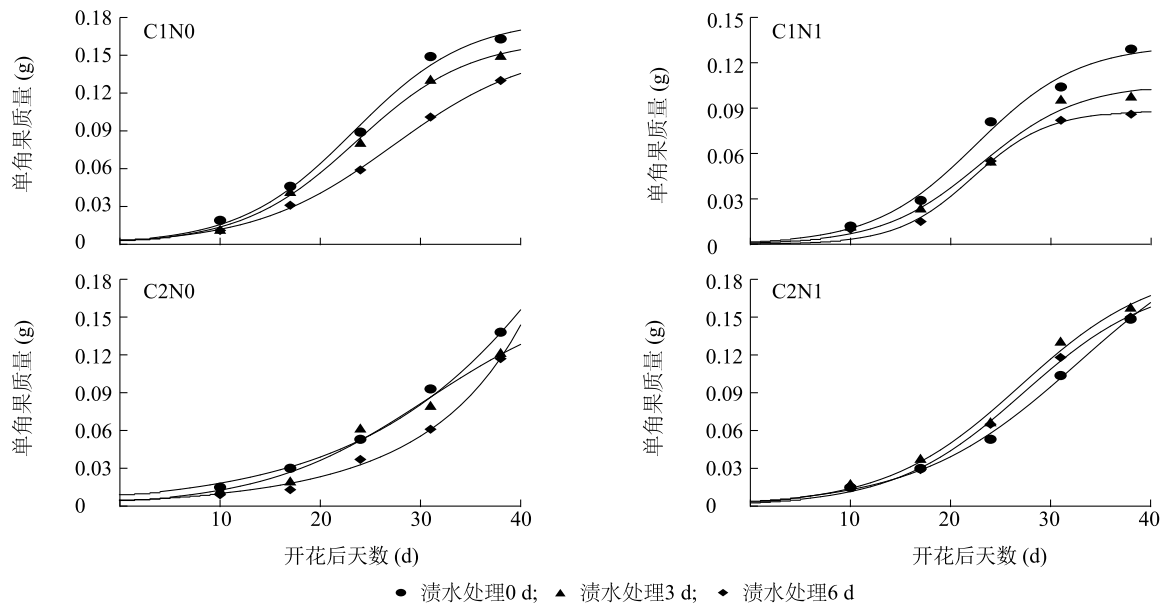
图 2 是池栽时两品种在不施肥与施肥条件下不同渍水持续时间对油菜籽粒充实过程的影响。从图 2 中可以看出,随花后时间延长,油菜籽粒充实同样经历了“慢-快-慢”变化过程,快速增长期一般也位于开花后 10~25 d。宁油 22 越接近成熟期单角果增质量越慢,开花后 10~30 d 为主要籽粒充实期;宁杂 1818 在后期单角果增质量加快,主要集中在开花后 20~40 d。与不渍水对照相比,随渍水持续时间延

长,油菜单角果增质量速率明显下降;施肥处理的籽粒充实速率大于不施肥处理。

以花后天数 (d) 为自变量,单角果质量 (W) 为因变量,采用 Logistic 方程对池栽油菜籽粒充实过程进行拟合,不同品种、施肥量与不同渍水持续时间下各参数值及方程统计量见表 3。从表 3 中可以看出,其决定系数 R^2 都在 0.98 左右,说明 Logistic 方程能较好地模拟渍水时油菜籽粒充实增质量过程。由方程参数变化可见,在参数 b 、 c 一定时,不施肥条件下宁油 22 在渍水持续 3 d 和 6 d 时其参数 a 减小 1.1 倍,宁杂 1818 在渍水持续 6 d 时参数 a 减小 1.3 倍,幅度略大;施肥条件下宁油 22 在渍水 6 d 时其参数 a 减小 1.5 倍,幅度较大,而宁杂 1818 在渍水

持续 3 d 时参数 a 减小 4.1 倍。可见参数 a 值在一定程度上反映了不同品种籽粒充实过程对不同施肥量与渍水时间的响应差别。与桶栽相比,池栽时参数

a 随渍水持续时间延长而减小的幅度总体较低,反映其受渍害的影响较小。



C1N0: 宁油 22 不施肥; C1N1: 宁油 22 施肥; C2N0: 宁杂 1818 不施肥; C2N1: 宁杂 1818 施肥。

图 2 不同施肥量下花期不同渍水持续时间处理对油菜籽粒充实过程的影响(池栽)

Fig.2 Effects of different waterlogging duration treatments at florescence stage on grain filling of rape seeds under different fertilization amounts (pond planting)

表 3 不同品种、施肥、渍水持续时间处理下油菜籽粒充实单角果质量动态 Logistic 方程参数(池栽)

Table 3 Parameters of the Logistic equation of the single pod weight variations in the grain filling process of rape under different treatments of varieties, fertilization and waterlogging duration(pond cultivation)

品种	施肥	渍水持续时间 (d)	a	不渍水 a / 渍水 a	b	c	相关系数 (r)	决定系数 (R^2)	相关系数显著性 阈值 (Sig)
宁油 22 (C1)	不施肥 (N0)	0	0.179		60.7	0.176	0.997 5 ***	0.995 0	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		3	0.163	1.1	63.4	0.176	0.998 7 ***	0.997 4	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		6	0.157	1.1	52.2	0.145	0.999 5 ***	0.999 0	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
	施肥 (N1)	0	0.132		81.0	0.195	0.994 4 ***	0.988 8	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		3	0.106	1.2	111.0	0.205	0.992 1 ***	0.984 3	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		6	0.089	1.5	367.0	0.266	0.994 6 ***	0.989 2	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
宁杂 1818 (C2)	不施肥 (N0)	0	0.228		56.4	0.123	0.998 5 ***	0.997 0	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		3	0.191	1.2	56.4	0.149	0.995 0 ***	0.990 0	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		6	0.180	1.3	68.8	0.155	0.998 5 ***	0.997 0	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
	施肥 (N1)	0	0.690		81.5	0.079	0.997 2 ***	0.994 4	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		3	0.169	4.1	42.1	0.122	0.988 1 **	0.996 2	$r_{(3,0.001)} = 0.991$
		6	-0.543	-1.3	-124.0	-0.081	0.997 0 ***	0.994 0	$r_{(3,0.001)} = 0.991$

a 、 b 、 c 为方程参数。*、**、*** 为 $P < 0.001$ 。

另外从渍水影响因子 (WIF) 变化看, 宁油 22 不施肥渍水持续 3 d 和 6 d 处理的籽粒充实 WIF 范围分别为 $-0.08 \sim -0.37$ 和 $-0.20 \sim -0.42$, 在施肥条件下则分别为 $-0.17 \sim -0.32$ 和 $-0.17 \sim -0.48$ 。其中, 渍水持续

6 d 处理的 WIF 达最大。渍水对籽粒充实的影响集中在花后第 17~31 d, 不施肥渍水持续 3 d 和 6 d 处理对籽粒充实影响最大值均位于花后 10 d, 不施肥渍水持续 6 d 处理花后 10~31 d 延续这一较大影响, 至成

熟期影响较小;施肥渍水持续 3 d 和 6 d 处理对籽粒充实影响最大值分别位于花后 24 d 和 17 d,成熟期有一定影响(表 2)。宁杂 1818 不施肥渍水持续 3 d 和 6 d 处理的籽粒充实 WIF 范围分别为 $-0.12\sim-0.31$ 和 $-0.15\sim-0.57$;在施肥条件下分别为 $-0.03\sim-0.31$ 和 $-0.08\sim-0.41$ 。其中,渍水持续 6 d 处理的 WIF 达最大。渍水对籽粒充实的影响集中在花后第 17~31 d,不施肥渍水持续 3 d 和 6 d 处理对籽粒充实影响最大值均位于花后 17 d,成熟期有一定影响;施肥渍水持续 3 d 和 6 d 处理对籽粒充实影响最大值均位于花后

10 d,成熟期影响较小(表 2)。

为了将受渍害影响时籽粒充实过程简化表达为一个统一模型,基于 2018–2019 年池栽试验数据,以花后天数为自变量,单角果质量为因变量,不分施肥与渍水持续时间水平,仅对两品种池栽油菜籽粒充实过程进行拟合,其符合 Logistic 方程(图 3),方程参数见表 4。由表 4 可知,其相关系数(r)都达 0.001 极显著水平,决定系数(R^2)分别为 0.869 0、0.922 9,说明该 Logistic 方程能较好地模拟渍水条件下油菜籽粒充实过程。

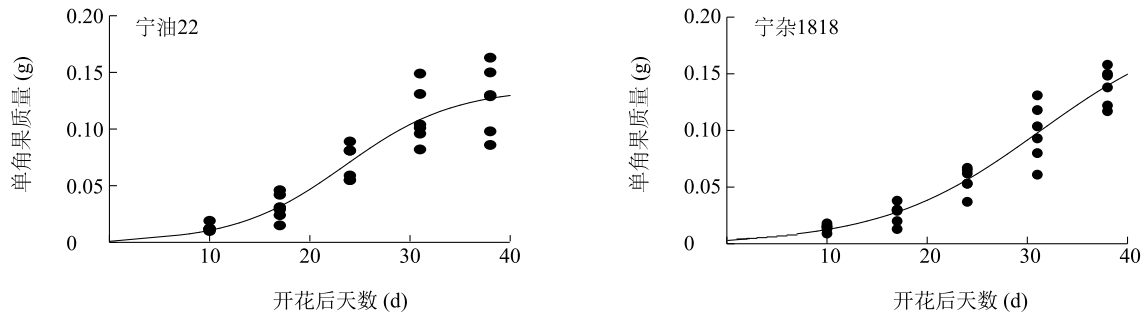


图 3 不同品种油菜籽粒充实过程

Fig.3 Grain filling processes of rape varieties

表 4 不同品种油菜籽粒充实单角果质量动态 Logistic 方程参数(池栽)

Table 4 Parameters of the Logistic equation of the single pod weight variations in the grain filling process of different rape varieties (pond cultivation)

品种	a	b	c	相关系数(r)	决定系数(R^2)	相关系数显著性阈值(Sig)
宁油 22(C1)	0.136	74.17	0.183	0.932 2 ***	0.869 0	$r_{(28,0.001)} = 0.570$
宁杂 1818(C2)	0.199	53.07	0.127	0.960 7 ***	0.922 9	$r_{(28,0.001)} = 0.570$

a 、 b 、 c 为方程参数。*** 表示相关性达到极显著水平($P<0.001$)。

2.3 模型验证

利用 2017–2018 年池栽不同品种处理下油菜单角果质量动态独立数据对表 4 中的 Logistic 方程进行检验(表 5 和图 4)。从表 5 可以看出,不同品种实测值与模拟值平均绝对误差(d_a)和均根方差

($RMSE$)均较小,相关系数均达到极显著水平,其中宁杂 1818 的 d_a 值较宁油 22 小,同时宁杂 1818 实测值与模拟值精确度较宁油 22 更好(图 4),说明其模型精度更高。

表 5 油菜单角果质量动态实测值与估测值的统计量

Table 5 Statistics of dynamic measured and estimated values of single pod weight of rape

品种	平均绝对误差(d_a) (g)	均根方差($RMSE$) (g)	相关系数 (r)	决定系数 (R^2)	相关系数显著性阈值 (Sig)
宁油 22(C1)	0.021 4	0.026	0.976 ***	0.952 6	$r_{(16,0.001)} = 0.708$
宁杂 1818(C2)	0.019 0	0.026	0.970 ***	0.940 9	$r_{(16,0.001)} = 0.708$

*** 表示相关性达到极显著水平($P<0.001$)。

3 讨论

油菜产量由单位面积角果数、角粒数和千粒质

量共同构成^[19-20],而油菜籽粒充实过程在很大程度上影响和决定角粒数和千粒质量这两项产量构成因素。定量不同施肥量下花期不同渍水持续时间胁迫

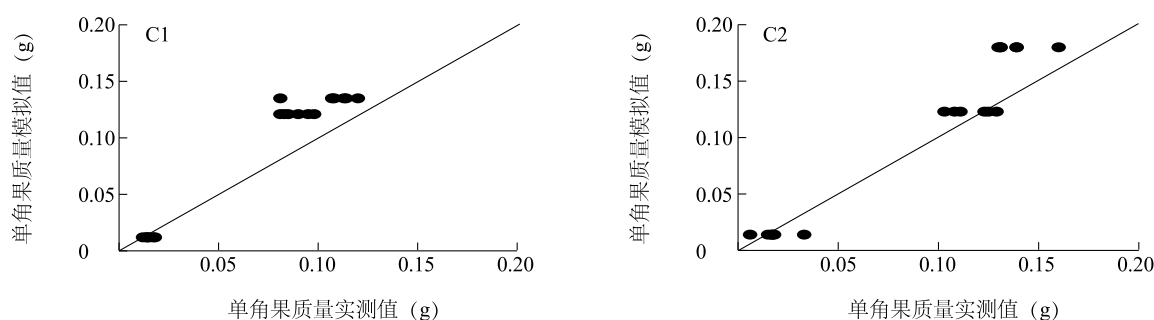


图4 两油菜品种籽粒充实过程实测值与估测值 1:1 图

Fig.4 1:1 map of measured value and estimated value during the grain filling process of two rape varieties

对油菜籽粒充实过程的影响,对揭示其产量形成具有重要意义。

本研究采用桶栽和池栽两种种植方式,其中,桶栽渍水处理人工较易控制,但其生长条件与大田生产有一定差别;池栽更接近大田生产,但渍水处理人工较难控制,利用相同品种、施肥与渍水持续时间处理能够兼顾两者的优缺点。比如,不施肥时,宁油 22 相同渍水持续时间条件下池栽的单角果质量均明显高于桶栽的,宁杂 1818 只有无渍水条件下池栽的单角果质量明显高于桶栽的,同时也反映出宁油 22 较耐瘠。在施肥情况下,无论桶栽还是池栽,也无论渍水持续时间长,本研究中花后同一时间段内单角果质量明显提高,这与文献[13]、[14]结果有相似之处。在桶栽和池栽两种种植方式下,利用 *WIF*、Logistic 方程参数 a 定量分析了品种、施肥与渍水持续时间对油菜籽粒充实过程的影响,既体现严格控制渍水持续时间时的一般规律,也反映了接近大田条件下的影响与差异。这与刘凯文等^[10]利用相对渍害指数及渍害损失贡献率定量研究春季湿渍害对油菜产量结构的影响与减产效应有共同之处。

所选用两个品种宁油 22 和宁杂 1818,既有耐瘠性差异,又有耐渍性不同,可以代表两个品种类型,但生产上尚有较多品种,结果应用需要注意条件和地域。Li 等^[17]也研究了用于预测耐渍性不同指标的一致性。试验只在南京点进行,主要结果分析以 2018–2019 年试验数据为主,尚需利用更多生态点及多个年份数据进一步检验和验证。由于试验场地条件所限,池栽渍水持续最长时间仅设为 6 d,虽然也反映了一定趋势,但这使结果分析及结论会有一定局限性。由于油菜籽粒较小,特别是在籽粒形成过程中较难获取,因此,本研究用单角果质量变化

表现籽粒充实过程,这与用籽粒质量变化表现籽粒充实过程理论上还存在一定区别。为了克服 2017–2018 年池栽不同品种处理下油菜籽粒充实单角果质量动态独立数据量不足,仅对受渍害影响时籽粒充实过程的一个统一模型进行了检验,未能对每个施肥与渍水持续时间处理的 Logistic 方程进行逐一检验。由于 Logistic 方程尚属经验统计模型,不能响应不同年份的气象条件等差异,也会造成年度间不同品种模拟效果差异。

4 结 论

(1) 桶栽和池栽条件下,不同施肥和渍水持续时间处理对油菜籽粒充实的影响具有共同趋势,即随花后时间延长,油菜籽粒充实经历了“慢-快-慢”变化过程。快速增长期一般位于开花后 10~25 d,越接近成熟期单角果增质量越慢,开花后 10~30 d 为主要籽粒充实期。与不渍水对照相比,随渍水持续时间延长,油菜籽粒增质量速率明显下降;施肥处理的籽粒充实速率大于不施肥处理。

(2) 桶栽和池栽条件下,不同施肥和渍水持续时间处理对油菜籽粒充实的影响也有品种、施肥与渍水持续时间差异,即桶栽时,两品种渍水持续时间 0 d 和 3 d 处理的油菜单角果增质量加快多数从花后第 10 d 开始,渍水持续时间 6 d 和 9 d 处理的油菜单角果增质量加快多数从花后第 20 d 左右开始。池栽时,宁油 22 越接近成熟期单角果增质量越慢,开花后 10~30 d 为主要籽粒充实期;宁杂 1818 在后期单角果增质量加快,主要集中在花后 20~40 d。

(3) 采用 *WIF* 和 Logistic 方程参数 a 定量了品种、施肥与渍水持续时间对油菜籽粒充实过程的影响,两者均能敏感识别不同条件下的影响程度大小。

(4) 一个统一的 Logistic 方程可较好定量不同品种、施肥、渍水持续时间处理下油菜单角果增质量随花后天数的变化过程, 宁杂 1818 的平均绝对误差较宁油 22 小。

参考文献:

- [1] 程沅孜, 李谷成, 李欠男. 中国油菜生产空间布局演变及其影响因素分析[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版), 2016, 17(2): 9-15.
- [2] 曹宏鑫, 杨太明, 蒋跃林, 等. 花期渍害胁迫下冬油菜生长及产量模拟研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 137-145.
- [3] DAI S W, ZHU J Q. Formation, mechanism and prevention of waterlogging damage for oilseed rape in Southern Plain [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 9: 1.
- [4] GAO J Q, PU H M, LONG W H, et al. Dynamics of oleic acid contents in organs of high-oleic rapeseed lines[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34: 359-365.
- [5] SULEK M W, KULCAYCHUI A, MALYSA A. Assessment of lubricity of compositions of fuel oil with biocomponents derived from rapeseed [J]. Wear, 2010, 268: 104-108.
- [6] 朱建强, 程伦国, 吴立仁, 等. 油菜持续受渍试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 64-66.
- [7] ZHOU W J, LIN X Q. Effects of waterlogging at different growth stages on physiological characteristics and seed yield of winter rape (*Brassica napus* L.) [J]. Field Crops Research, 1995, 44(2/3): 103-110.
- [8] WOLLMER A C, PITANN B, MUHLING K H. Waterlogging events during stem elongation or flowering affect yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) but not seed quality [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2018, 204(2): 165-167.
- [9] XU M Y, MA H Q, ZENG L, et al. The effect of waterlogging on yield and seed quality at the early flowering stage in *Brassica napus* L. [J]. Field Crops Research, 2015, 180: 238-245.
- [10] 刘凯文, 苏荣瑞, 潘建成, 等. 春季湿渍害对油菜产量结构的影响与减产效应[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(5): 63-66.
- [11] 张文英, 朱建强, 郭显平, 等. 花果期持续受渍对油菜生长、产量与含油量的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(2): 194-197.
- [12] BOEM F H G, LAVADO R S, PORCELLI C A. Note on the effects of winter and spring waterlogging on growth, chemical composition and yield of rapeseed [J]. Field Crops Research, 1996, 43(2/3): 175-179.
- [13] 陈红琳, 陈尚洪, 郑盛华, 等. 增施氮素对苗期渍水胁迫冬油菜生理特性及产量的调控效应[J]. 土壤, 2017, 49(3): 519-526.
- [14] 邹娟, 朱建强, 吴启侠, 等. 氮磷钾施用对薹花期受渍油菜产量及养分吸收的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(20): 4956-4959.
- [15] 刘波, 魏全全, 鲁剑巍, 等. 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 144-153.
- [16] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 等. 花期渍水逆境下氮素对油菜产量及氮肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1169-1176.
- [17] LI H J, CHAI L, ZHANG J F, et al. Consistency of different indices in rapeseed (*Brassica napus*) may predict the waterlogging tolerance [J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2016, 18(1): 61-67.
- [18] CAO H X, HANAN J S, LIU Y, et al. Comparison of crop model validation methods [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(8): 1274-1285.
- [19] 岳绪国, 葛永申, 景德道, 等. 移栽密度和方式对不同类型油菜品种产量及构成的调控效应[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 63-69.
- [20] 王锐, 吴位仙, 郑卫东, 等. 氮素水平与品种对直播冬油菜农艺性状、产量及其构成因子的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 77-81.

(责任编辑: 张震林)