

姜丽霞,于艳梅,刘泽恩,等.淹涝胁迫对寒地水稻生长和产量的影响研究[J].海洋气象学报,2020,40(2):140-148.
JIANG Lixia, YU Yanmei, LIU Zeen, et al. Impact of waterlogging stress on japonica rice growth and yield in cold region[J].
Journal of Marine Meteorology, 2020, 40(2): 140-148. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.015. (in Chinese)

淹涝胁迫对寒地水稻生长和产量的影响研究

姜丽霞¹, 于艳梅², 刘泽恩³, 王萍¹, 孙丽莉⁴, 闫平¹, 赵慧颖¹

(1. 黑龙江省气象科学研究所/中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室/黑龙江省气象院士工作站, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 通河县气象局, 黑龙江 通河 150900; 4. 五大连池市气象局, 黑龙江 五大连池 164100)

摘要: 2018年在黑龙江省庆安县选用寒地水稻龙粳31品种进行淹水试验,在拔节孕穗期、抽穗开花期,分别设定3个淹水深度(1/3株高、2/3株高、3/3株高)、2个淹水历时(3 d、7 d)共12个淹水处理,测定淹水前后的株高、叶面积、干物质及收获后的每穗粒数、结实率、千粒重及产量等。结果表明:水稻淹水后,株高、叶面积指数、干物质平均增长量基本高于同时期对照组,在一定程度上可以说明适度的淹涝胁迫对水稻植株生长具有促进作用,拔节孕穗期各项与对照组相比的增长程度均低于抽穗开花期;不同淹涝胁迫均导致水稻减产,拔节孕穗期全淹没7 d减产最严重,穗结实粒数仅55粒,千粒重16.9 g,远低于对照,减产率高达70%,抽穗开花期全淹没7 d减产也较严重,穗结实粒数为71粒,千粒重略低,但单位面积有效穗数最少,为 2.83×10^6 穗,减产率达57%;淹水深度1/3 h、2/3 h、3/3 h处理的平均减产率依次为16%、18%、48%,淹水持续3 d、7 d的平均减产率分别为21%、33%,可见随着淹水深度加深、淹水历时加长,水稻减产幅度加大;淹涝胁迫条件下,拔节孕穗期水稻产量的下降幅度大于抽穗开花期,导致两个发育期减产的主要产量构成因素分别为穗结实粒数、单位面积有效穗数。

关键词: 水稻; 淹涝胁迫; 关键生育期; 产量

中图分类号: S16 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)02-0140-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.015

Impact of waterlogging stress on japonica rice growth and yield in cold region

JIANG Lixia¹, YU Yanmei², LIU Zeen³, WANG Ping¹, SUN Lili⁴, YAN Ping¹, ZHAO Huiying¹

(1. Heilongjiang Institute of Meteorological Sciences/Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast China, CMA/Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Province Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China; 3. Tonghe Meteorological Bureau, Tonghe 150800, China; 4. Wudalianchi Meteorological Bureau, Wudalianchi 164100, China)

Abstract In 2018, Longjing-31 of Japonica rice variety was planted in Qing'an County of Heilongjiang Province for the rice flooding experiment in cold region. At the jointing and booting stage, heading and flowering stage, three flooding depths (1/3 plant height, 2/3 plant height, and total plant height) and two flooding durations (3 d and 7 d) are designed for 12 flooding treatments, respectively. During the

收稿日期:2020-02-19; 修订日期:2020-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(31671575, 31671576);中国气象局沈阳大气所和辽宁省农业气象灾害重点实验室项目(2019SYIAE04);中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室项目(stqx2019zd01)

作者简介:姜丽霞,女,硕士,正高级工程师,主要从事应用气象、气候资源和气候变化的相关研究,hljlx@163.com。

experiment, the tiller number before and after flooding, the plant height, LAI (leaf area index), dry matter, grain number per panicle, seed setting rate, 1 000-grain weight, and yield are measured and comparative analysis is conducted. The results are shown below. 1) After flooding, the average increase of plant height, LAI, and dry matter is higher than that of the CK (control check), which indicates that the moderate waterlogging stress could promote the growth of rice plant to some extent. Compared with the CK, the growth degree of all items in jointing and booting stage is lower than that in heading and flowering stage. 2) Different waterlogging stress leads to the reduction of Japonica rice yield. The yield is reduced most seriously after 7 d of total submergence at the jointing and booting stage, the number of grains per ear is only 55, and the 1 000-grain weight is 16.9 g, which are far lower than those of the CK, so the yield reduction rate is as high as 70%. The yield is reduced seriously after 7 d of total submergence at heading and flowering stage, the number of grains per ear is 71, the 1 000-grain weight is slightly lower, but the number of effective ears per unit area is 2.83×10^6 , which is the least in all treatments, so the yield reduction rate is 57%. The average yield reduction rates of three flooding depths (1/3 plant height, 2/3 plant height, and total plant height) are 16%, 18%, and 48%, respectively, and the average yield reduction rates of durative waterlogging for 3 d and 7 d are 21% and 33%, respectively. On the whole, the reduction of rice yield increases with the deepening and lengthening of waterlogging. 3) Under the flooding stress, the decrease of rice yield at jointing and booting stage is greater than that at heading and flowering stage, and the main yield components leading to yield reduction in the two growth stages are the number of grains per ear and the number of effective ears per unit area, respectively.

Key words rice; waterlogging stress; key growth period; yield

引言

近年寒地水稻在东北地区发展迅速,黑龙江省已成为我国最重要、最大的粳稻产区和商品稻区,其水稻年总产量高达 2.7×10^{10} kg,占全国稻谷总产量的 12.5%,是国家粮食安全的压舱石。黑龙江省位于中国最北部,为典型“气候脆弱区”,夏季降水集中和极端气候事件使洪涝较易发生,导致水稻产量因洪涝灾害损失严重^[1-2],对水稻安全生产构成严重威胁。因此研究洪涝对水稻的量化影响,对保障国家粮食安全和推动农业经济可持续发展具有重要意义。

多年来,国内外许多专家学者先后对气候变化引发灾害及其影响开展了大量研究工作^[3-6]。研究指出,洪涝灾害造成的损失超过所有因自然灾害损失的 30%^[7],而在其对农林牧渔业的影响中,农业的受影响程度最严重^[8]。国外有学者开展了洪涝灾害对水稻的影响研究,YOSHIDA^[9]研究认为水稻在灌浆期遭受淹涝会直接影响功能叶作用的发挥而引起减产,GANJI et al.^[10]研究表明,洪涝会对水稻的生理性状、长势、产量造成严重影响并导致巨大产量减损,KAR et al.^[11]通过试验发现,水稻有效

分蘖数随淹水深度的增加而减少,最大降幅达 48%。国内研究主要集中于南方水稻,研究者多利用数理统计、系统调查、模拟试验等方法,分析洪涝灾害对超级稻、常规稻以及南方早、中、晚稻生长和产量的影响,并研究了水稻根系、株高、生育进程、幼穗发育、开花受精、产量构成因素等对涝害的反应^[12-14]。有研究表明,洪涝灾害对江西省不同季水稻产量的影响程度居所有灾害之首^[14]。洪涝导致早稻幼穗坏死、花粉破坏而减产,对中稻主要表现为分蘖推迟,生育期延长^[15]。由多数试验结论可见,水稻绿叶数与淹水持续时间呈负相关关系^[16],处于分蘖期、拔节期、孕穗期的水稻在淹水处理期内株高增长率有增加趋势^[17],分蘖期淹没超过 6 d 则死苗率大于 80%,且不能完全恢复生长^[18],抽穗前后水稻受淹影响更大,淹没时间 5~6 d 时,产量大幅度下降^[19]。

随着气候变化的日趋明显,异常降水天气较多^[20-21],洪涝灾害发生呈频数增加、强度增强、危害加重的趋势^[5-6],未来黑龙江省江河区域洪涝发生也呈增加趋势^[22],而黑龙江省沿江河流域水稻种植面积较大,加之平原稻田不易排水,因此遭受洪涝灾害威胁及影响的风险明显加大。迄今为止,关于

洪涝对寒地水稻生长发育和产量影响研究的报道仍较少见,基于此,采用淹水试验方法,在水稻关键生育期进行淹涝胁迫,从水稻株高、叶面积指数、干物质、产量等因子入手,探索研究淹涝胁迫对寒地水稻的影响,以期为寒地水稻安全生产、合理种植及结构调整提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2018年,在庆安灌溉试验站(127°30'4"E, 46°52'41"N)开展水稻淹涝胁迫模拟试验,该试验站隶属于黑龙江省水稻主产区的绥化市庆安县。供试水稻品种为龙粳31,该品种现为黑龙江省水稻主栽品种。采用测桶移位受淹法,测桶半径0.16 m,桶高0.37 m。水稻育秧及移栽在试验当地的普遍期进行,水稻育秧方式采用大棚钵育苗,播种时间为4月10日。5月21日移栽至试验区内,每个

测桶移栽3穴,每穴3~5株。至水稻拔节孕穗期、抽穗开花期分别进行淹水处理,拔节孕穗期淹水时间为7月11日(移栽后50 d),抽穗开花期淹水时间为7月30日(移栽后69 d)。每个发育期淹水处理均设为3个淹水深度(根据株高 h 设定)、2个淹水历时,淹水深度 $1/3$ 株高,淹水历时3 d,表示为 $1/3h-3d$,依次类推,具体见表1。

试验共设12个处理,每个处理3个重复,同时设对照(CK)处理,对各处理进行随机设计。试验在淹水池环境下测桶中进行,淹水池设有全淹没区、 $2/3$ 淹没区、 $1/3$ 淹没区,深度分别为1.6 m、1.2 m、0.8 m,长和宽均为2 m和1.47 m。测桶土壤按每层10 cm的标准进行回填,土壤容重与原状土相近,测桶底部设有5 cm厚的反滤层。水稻淹水胁迫模拟试验小区的田间管理与当地大田常规管理保持一致。

表1 水稻淹涝试验设计

Table 1 Design of rice flooding experiment

发育期	淹水日期	试验处理	试验处理代码	试验因素水平	
				淹水深度/cm	淹水历时/d
拔节孕穗期	7月11日 (移栽后50 d)	1/3h-3d	BJ-1	淹水 $1/3$ 株高(水深20 cm)	3
		1/3h-7d	BJ-2		7
		2/3h-3d	BJ-3	淹水 $2/3$ 株高(水深40 cm)	3
		2/3h-7d	BJ-4		7
		1h-3d	BJ-5	淹水 $3/3$ 株高(水深60 cm)	3
		1h-7d	BJ-6		7
抽穗开花期	7月30日 (移栽后69 d)	1/3h-3d	CS-1	淹水 $1/3$ 株高(水深30 cm)	3
		1/3h-7d	CS-2		7
		2/3h-3d	CS-3	淹水 $2/3$ 株高(水深60 cm)	3
		2/3h-7d	CS-4		7
		1h-3d	CS-5	淹水 $3/3$ 株高(水深90 cm)	3
		1h-7d	CS-6		7

1.2 数据测量与处理分析

试验期间,对株高、叶面积指数(leaf area index, LAI)、干物质等能够反映水稻生长发育状况的项目进行观测,叶面积测定采用无损测量法,仪器为CI206激光叶面积仪,干物质测定则在各处理小区取有代表性的植株,测定水稻地上部干物质量,株高、叶面积指数、干物质的观测频次、观测时间、观测样本数量等见表2。收获后,调查统计穗结实粒数、结实率、千粒重、单位面积有效穗数等产量构成要素。

利用数理统计方法对各项观测数据进行统计分析。水稻淹水后株高、叶面积指数、干物质增长量的计算公式为:

$$V_{i-1} = Y_i - Y_{i-1} \quad (1)$$

式中 V_{i-1} 为水稻淹水后株高(或叶面积指数或干物质)的增长量, Y_i 为淹水后第 i 次观测值, Y_{i-1} 为淹水后第 $i-1$ 次观测值。为方便分析,本文规定拔节孕穗期株高、叶面积指数、干物质的增长量分别记为BJ-VZ、BJ-VL、BJ-VM,抽穗开花期分别记为CS-VZ、CS-VL、CS-VM,则拔节孕穗期、抽穗开花期淹

水后株高第二次观测值与第一次观测值的增量
分别记作 BJ-VZ₁、CS-VZ₁，依次类推。叶面积指

表 2 观测项目信息一览表

Table 2 Information list of observation items

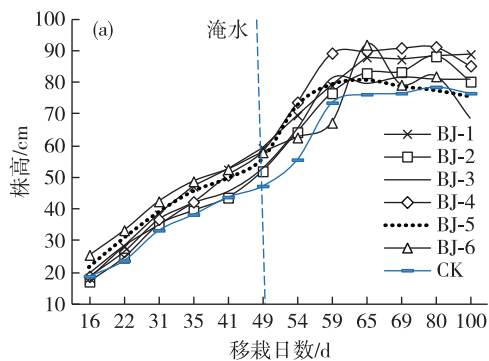
观测要素	观测次数/次	观测时间(月-日)	样本数/(穴·次 ⁻¹)
株高	12	06-06,06-13,06-22,06-26,07-02,07-10	3
		07-15,07-20,07-26,07-30,08-10,08-30	
叶面积指数	6	06-26,07-03,07-11,07-30,08-09,08-30	3
干物质	8	05-21,06-06,06-21,07-02	3
		07-11,07-30,08-09,08-31	

2 结果与分析

2.1 不同淹涝胁迫对水稻株高的影响

株高作为水稻作物直观的形态指标,可考察水稻植株长势状况,因此不同淹水条件下株高变化及比较能在一定程度上反映淹水胁迫对水稻生长的影响。

图 1 给出了寒地水稻龙粳 31 拔节孕穗期(图



1a)、抽穗开花期(图 1b)不同淹水处理及对照株高,图 1a、b 中虚竖线表示移栽日数所对应的淹水日。由图 1 可见,不同淹涝胁迫下的水稻株高与对照组株高变化趋势基本相同,株高存在差异,淹水后,各处理与对照株高差值为-8.0~18.2 cm,多数时间对照组株高偏小,最后一次观测值显示,BJ-5 株高略低于对照,BJ-6 即全淹没 7 d 的株高较对照偏低 8 cm,其余 10 个处理株高均高于对照。

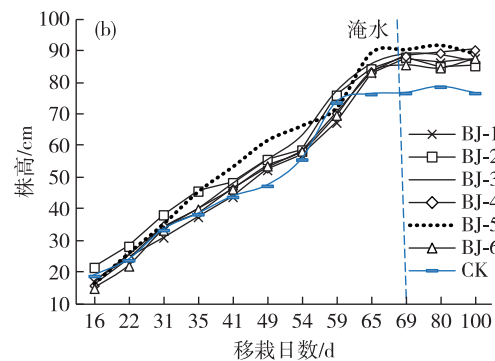


图 1 不同淹水处理条件下水稻株高(单位:cm)与对照组比较(a.拔节孕穗期,b.抽穗开花期)

Fig.1 Comparison of plant height of rice (units: cm) under different flooding treatments with that of CK (control check) (a. jointing and booting stage, b. heading and flowering stage)

分析两个发育期淹水后株高的增长量,由表 3 可见,在拔节孕穗期淹水后,株高增长量 BJ-VZ 呈

波动变化,除 BJ-6 处理外,其他处理 BJ-VZ 基本呈少—多—少变化,与对照组(CK)比较,各处理 BJ-

表 3 不同淹水处理淹水后水稻株高增长量变化

Table 3 Change of increase of plant height after different flooding treatments

处理	BJ-VZ ₁	BJ-VZ ₂	BJ-VZ ₃	BJ-VZ ₄	BJ-VZ ₅	平均值	处理	CS-VZ ₁
BJ-1	9.3	9.0	-0.7	1.0	0.7	3.9	CS-1	1.3
BJ-2	12.3	6.3	0.3	5.0	-8.0	3.2	CS-2	0.3
BJ-3	16.0	-1.7	2.0	-0.7	0.0	3.1	CS-3	-2.0
BJ-4	15.5	0.7	1.0	0.3	-6.0	2.3	CS-4	1.0
BJ-5	6.7	1.3	-2.0	-1.3	-2.0	0.5	CS-5	-2.7
BJ-6	4.7	24.7	-12.7	2.7	-13.3	1.2	CS-6	3.0
CK	18.0	-7.3	0.3	2.0	-2.0	2.2	CK	-2.0

VZ₁均偏少, BJ-VZ₂恰好相反, 其余增长量则或多或少。抽穗开花期淹水后仅观测2次, 2次的差值CS-VZ₁变化不同, 与对照组比较, 其值或高或低。进一步比较株高增长量的平均值可见, 拔节孕穗期总平均增长量为2.4 cm, 较对照偏高0.2 cm, 抽穗开花期平均增长量为0.2 cm, 较对照偏高2.2 cm。总体来看, 水稻在拔节孕穗期、抽穗开花期受淹后生长加快, 其株高平均增长量均高于同时期的对照, 由偏高程度看, 拔节孕穗期低于抽穗开花期。

2.2 不同淹涝胁迫对水稻叶面积指数的影响

图2给出了寒地水稻龙粳31拔节孕穗期(图2a)、抽穗开花期(图2b)不同淹水处理及对照叶面

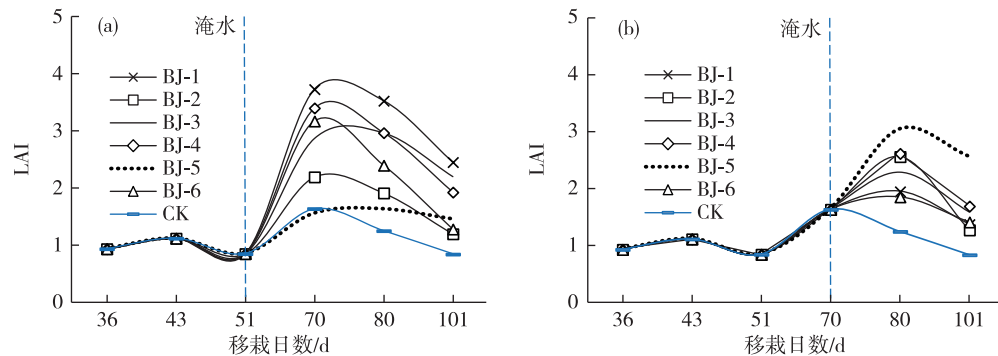


图2 不同淹水处理的水稻叶面积指数与对照组比较(a.拔节孕穗期,b.抽穗开花期)

Fig.2 Comparison of LAI (leaf area index) of rice under different flooding treatments with that of CK (a. jointing and booting stage, b. heading and flowering stage)

由水稻淹水后叶面积指数增长量的变化来看, 两个发育期各处理叶面积指数增长量均呈逐渐减少趋势, 拔节孕穗期除BJ-5外, 其他处理BJ-VL₁均大于对照, BJ-VL₃均小于对照, BJ-VL₂则或大或小。抽穗开花期淹水后各处理CS-VL₁均大于对照, 而CS-VL₂多小于对照(表4)。拔节孕穗期叶面积指

积指数, 图2a、b中虚竖线表示移栽日数所对应的淹水日。由图2可见, 不同淹涝胁迫下的水稻叶面积指数与对照组叶面积指数呈同步变化, 淹水后, 淹涝胁迫下的叶面积指数比对照组明显偏大, 拔节孕穗期除BJ-5即全淹没3d处理略低于对照外, 其余处理叶面积指数比对照组偏多30%~190%。抽穗开花期各处理叶面积指数均高于对照组, 偏多48%~204%。最后一次观测值与对照比较可见, 12个处理的叶面积指数均高于对照。淹涝胁迫下叶面积指数变化趋势与株高相似, 符合水稻生长规律, 进一步说明适当淹涝胁迫对水稻生长具有刺激作用。

数总平均增长量为0.3, 较对照偏高0.3, 抽穗开花期总平均增长量为0, 较对照偏高0.4。可见, 水稻在拔节孕穗期、抽穗开花期受淹后, 其叶面积指数平均增长量变化与株高相似, 均表现为比同时期的对照偏高, 且拔节孕穗期增长量低于抽穗开花期。

表4 不同淹水处理淹水后水稻叶面积指数增长量变化

Table 4 Change of increase of LAI after different flooding treatments

处理	BJ-VL ₁	BJ-VL ₂	BJ-VL ₃	平均值	处理	CS-VL ₁	CS-VL ₂	平均值
BJ-1	2.9	-0.2	-1.1	0.5	CS-1	0.3	-0.6	-0.1
BJ-2	1.3	-0.3	-0.7	0.1	CS-2	0.9	-1.3	-0.2
BJ-3	2.0	0.1	-0.8	0.4	CS-3	0.6	-0.7	0.0
BJ-4	2.5	-0.4	-1.0	0.4	CS-4	1.0	-0.9	0.0
BJ-5	0.7	0.1	-0.2	0.2	CS-5	1.4	-0.5	0.5
BJ-6	2.3	-0.8	-1.1	0.1	CS-6	0.2	-0.4	-0.1
CK	0.8	-0.4	-0.4	0.0	CK	-0.4	-0.4	-0.4

2.3 不同淹涝胁迫对水稻干物质的影响

图3给出了寒地水稻龙粳31拔节孕穗期(图

3a)、抽穗开花期(图3b)不同淹水处理及对照的干物质, 图3a、b中虚竖线表示移栽日数所对应的淹水

日。由图 3 可见,不同淹涝胁迫下的水稻干物质与对照组干物质呈一致变化,略有差异,淹水后,淹涝胁迫条件下的干物质与对照组的差值在 $-3.1 \sim 9.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 73% 移栽日所对应的干物质较对照组偏多,其余偏少,拔节孕穗期 BJ-6 即全淹没 7 d 移

栽 101 d 的干物质比对照偏少最多,为 $3.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,而拔节孕穗期 BJ-1 处理移栽 101 d 的干物质比对照偏多最多。由最后一次观测的干物质来看,除 BJ-6 即全淹没 7 d 的干物质低于对照外,其余 11 个处理干物质均高于对照。

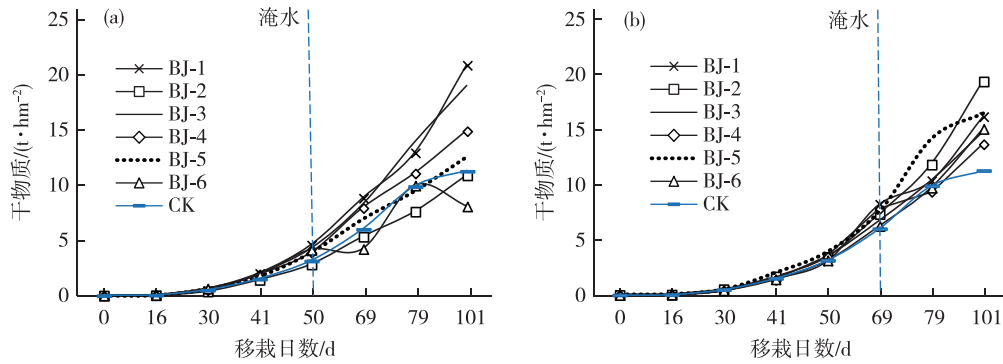


图 3 不同淹水处理的水稻干物质(单位: $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与对照比较(a.拔节孕穗期,b.抽穗开花期)

Fig.3 Comparison of dry matter of rice (units: $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) under different flooding treatments with that of CK (a. jointing and booting stage, b. heading and flowering stage)

水稻在拔节孕穗期淹水后不同处理的干物质增长量变化有所不同,BJ-1、BJ-2、BJ-4、BJ-5 干物质增长量呈少—多变化,BJ-3、BJ-6 则呈多—少变化,与对照组比较,各处理的 BJ-VM 或大或小。抽穗开花期除 CS-5 外,其余处理干物质增长量均呈增加态势,与对照组比较,各处理 CS-VM₁ 大小不一,而 CS-VM₂ 均大于对照(表 5)。拔节孕穗期干

物质总平均增长量为 $3.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,较对照偏多 $0.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,抽穗开花期总平均增长量为 $4.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,较对照偏多 $1.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可见,两个发育期干物质平均增长量均比同时期的对照偏多,与株高、叶面积指数相似,同样表现为拔节孕穗期增长量低于抽穗开花期。

表 5 不同淹水处理淹水后水稻干物质增长量变化

Table 5 Change of increase of dry matter after different flooding treatments

处理	BJ-VM ₁	BJ-VM ₂	BJ-VM ₃	平均值	处理	CS-VM ₁	CS-VM ₂	平均值
BJ-1	4.1	4.0	7.6	5.2	CS-1	2.1	5.6	3.8
BJ-2	2.4	2.2	3.2	2.6	CS-2	4.3	7.2	5.8
BJ-3	3.9	5.4	4.9	4.7	CS-3	3.5	4.2	3.9
BJ-4	3.9	3.0	3.7	3.5	CS-4	1.5	4.1	2.8
BJ-5	2.9	2.5	3.0	2.8	CS-5	6.3	2.2	4.2
BJ-6	0.1	5.5	-1.8	1.3	CS-6	3.3	5.1	4.2
CK	2.8	3.7	1.3	2.6	CK	3.7	1.3	2.5

2.4 不同淹涝胁迫对水稻产量的影响

表 6 列出了不同淹涝胁迫条件下龙粳 31 产量的变化。由表 6 可见,与对照组相比,大多数淹水处理的产量构成要素值较对照组偏低,结实率偏低 1%~10%,穗结实粒数偏少 3~51 粒,千粒重偏少 0.1~7.9 g,每公顷有效穗数偏少 $5.56 \times 10^4 \sim 8.34 \times 10^5$ 穗。由产量表现看,12 个淹水处理的产量不同程度低于对照组,均呈减产状态,减产率在 4%~

70%,抽穗开花期 CS-2 处理减产幅度最小,拔节孕穗期 BJ-6 即全淹没 7 d 减产最严重,减产率高达 70%。由表 6 还可看出,两个发育期的产量构成要素中,结实率、千粒重差异不大,但拔节孕穗期的穗结实粒数明显少于抽穗开花期,而其每公顷有效穗数却高于抽穗开花期。

对不同淹涝条件下龙粳 31 产量进行细致比较(表 6),分析发现:1)淹水深度越大,水稻减产越严

重,与对照组比较,淹水深度 1/3 h、2/3 h、3/3 h 处理的平均减产率依次为 16%、18%、48%,可见全淹没对水稻产量的负效应影响最大。2) 总体存在淹涝时间越长,减产越严重的趋势。在同一淹水深度条件下,比较不同淹水历时的产量,由表 6 可见,拔节孕穗期淹水 1/3 h、2/3 h、3/3 h 持续 7 d 比持续 3 d 的产量分别偏低 12%、10%、44%;抽穗开花期淹水 2/3 h、3/3 h 持续 7 d 比持续 3 d 的产量分别偏低 7%、47%,虽抽穗开花期淹水 1/3 h 持续 7 d 比持续

3 d 的产量略偏高,但各处理与对照比较来看,淹涝 3 d、7 d 的平均减产率分别为 21%、33%,可见淹涝 7 d 的减产率较淹涝 3 d 偏低 12%。3) 不同发育期遭受淹涝胁迫,水稻减产幅度存在差异,淹水深度 1/3 h、2/3 h、3/3 h 处理拔节孕穗期的平均减产率依次为 22%、25%、58%,而抽穗开花期依次为 9%、11%、38%,可见拔节孕穗期受淹后产量下降幅度大于抽穗开花期。

表 6 不同淹水处理的水稻产量变化

Table 6 Change of rice yield under different flooding treatments

发育期	处理	结实率/%	穗结实粒数	千粒重/g	每公顷有效穗数	产量/(kg·hm ⁻²)
拔节孕穗期	BJ-1	96	83	24.4	3.78×10 ⁶	7 356
	BJ-2	93	83	24.9	3.34×10 ⁶	6 453
	BJ-3	91	88	24.3	3.61×10 ⁶	7 007
	BJ-4	90	83	23.4	3.61×10 ⁶	6 311
	BJ-5	84	73	22.3	3.50×10 ⁶	4 781
	BJ-6	82	55	16.9	3.56×10 ⁶	2 684
抽穗开花期	CS-1	91	102	24.9	3.28×10 ⁶	7 557
	CS-2	91	109	25.4	3.39×10 ⁶	8 502
	CS-3	89	109	25.5	3.34×10 ⁶	8 223
	CS-4	89	103	24.9	3.34×10 ⁶	7 608
	CS-5	85	98	24.7	3.50×10 ⁶	7 218
	CS-6	83	71	23.1	2.83×10 ⁶	3 858
	CK	92	106	24.8	3.67×10 ⁶	8 872

3 讨论

本文基于水稻拔节孕穗、抽穗开花等关键生育期的淹水模拟试验,开展淹涝胁迫对黑龙江省水稻主栽品种龙粳 31 生长和产量的影响研究,由水稻生长状况的指标来看,淹水后两个发育期的株高、叶面积指数、干物质的平均增长量均高于对照平均增长量,且 92% 淹水处理 3 个观测项目的最后观测值均高于同期对照。以往大量研究表明,淹水处理使水稻生长加快,出水后株高、叶面积指数、干物质等比对照组均呈现不同程度的增加趋势^[17,23-24],本文分析结果与之一致。可见,适度的淹涝胁迫对水稻生长具有一定的促进作用。

淹涝胁迫造成水稻减产,不同发育期致使水稻减产的主要因素有所不同,由本文的分析结果来看,拔节孕穗期淹涝胁迫条件下造成水稻减产的主要产量构成因素为穗结实粒数,而抽穗开花期导致产量降低的主要因素为有效穗数。研究表明,孕穗

期淹涝胁迫主要是通过影响结实率及每穗粒数影响最终产量,因水稻受淹后可在其较高节位生出新的分蘖,则有效穗数不会受到较大影响,而抽穗开花期淹涝胁迫主要是通过影响结实率和有效穗数影响最终产量^[18],可见本文试验结果与上述分析情况完全一致。不同发育期水稻减产幅度也不相同,拔节孕穗期受淹后产量下降幅度大于抽穗开花期,这与宁金花等^[16]研究结论相符合。已有研究指出,孕穗期是水稻产量形成的关键时期,也是水稻对淹水最为敏感时期,此期淹涝胁迫会对水稻颖花分化和退化产生深刻影响,可能造成枝梗及颖花败育,使结实率、穗结实粒数显著减少^[18,26],由表 6 可见,拔节孕穗期各淹水处理穗结实粒数显著少于抽穗开花期,平均偏少高达 22 粒,虽其有效穗数略多,但不足以弥补产量损失,因此其产量低于抽穗开花期。

在不同淹水深度、不同淹水历时条件下,水稻减产程度不同,总体表现为淹水深度越深、淹水历时越长,水稻减产越重。分析其原因,1/3 h、2/3 h

淹水处理时,只有部分茎蘖和叶片被淹,露出水面的部分叶片仍能够进行光合作用并积累光合产物,且根部也可获得氧气,则其对短期淹涝的消耗具有一定抵御能力,从而对产量形成的不利影响相对较小,而全淹没则是整株淹没,水稻植株严重缺氧,其各项生理活动遭受严重阻碍,水稻产量形成受到巨大影响^[25]。由淹水时间来说,稻株对淹涝的耐性有限,对于短期淹涝,稻株可通过自身消耗维持生命,出水后仍有一定的恢复能力,但随着淹涝时间延长,稻株自身消耗量逐渐增大,水退后稻株的恢复能力下降^[16,19],形成产量能力也随之下降,因此造成的伤害较大,减产加重。

4 结论

1) 水稻植株生长对拔节孕穗、抽穗开花期淹涝胁迫具有一定适应性,受淹后,水稻株高、叶面积指数、干物质的平均增长量基本高于自然生长环境(对照)下的水稻,在一定程度上可以说明适度的淹涝胁迫对水稻生长具有促进作用,两个发育期各项增长量与对照相比较,拔节孕穗期的增长程度均低于抽穗开花期。

2) 水稻受淹后,产量形成受到不利影响,结实率、穗结实粒数、千粒重等产量构成要素出现不同程度下降,并表现为淹水愈深、淹水时间愈长,产量构成因素值愈低,拔节孕穗期全淹没7 d 穗结实粒数仅55粒,抽穗开花期穗结实粒数为71粒,均远低于对照,而拔节孕穗期全淹没7 d 处理的千粒重更低至16.9 g,较对照偏少7.9 g。

3) 与对照组比较,淹水深度1/3 h、2/3 h、3/3 h 处理的平均减产率依次为16%、18%、48%,淹水持续3 d、7 d 的平均减产率分别为21%、33%,另同一淹水深度下的产量基本也表现为淹水持续7 d 低于3 d,尤其全淹没7 d 较3 d 减产严重,产量下降幅度近50%,由此可见,淹涝胁迫导致寒地水稻减产,在淹水深度和淹水历时两个因素水平上,水稻减产率分别表现为1/3 h<2/3 h<3/3 h、3 d<7 d,即随着淹水深度加深、淹水历时加长,水稻减产幅度加大。

4) 比较而言,水稻拔节孕穗期淹涝胁迫条件下产量的降低幅度大于抽穗开花期,淹水深度1/3 h、2/3 h、3/3 h 处理的平均减产率比抽穗开花期依次偏高13%、14%、20%。淹涝胁迫导致拔节孕穗期水稻减产的主要产量构成因素为穗结实粒数,而抽穗开花期则为单位面积有效穗数,这与已有研究结论完全一致^[18]。

5) 本试验在灌溉试验站的试验区域进行,灌溉水为河水,与流域性洪涝比较接近,可使试验结果尽可能接近实际情况,但淹水处理仍与实际发生的洪涝灾害存在差异,并且本文在分析时未融入光、温等气候因素;另也有研究报道,水稻开花期受淹涝对产量的危害大于拔节期^[27],这些差异可能与研究者所用试材、淹涝试验条件以及观测方法等不一致有关,上述问题需要在后续工作中进行深入研究。

参考文献:

- [1] 姜丽霞,陈可心,刘丹,等.2013年黑龙江省主汛期降水异常特征及其对作物产量影响的分析[J].气象,2015,41(1):105-112.
- [2] 周瑾,祖世亨.“98”嫩江特大洪涝对大庆市粮食产量的影响[J].黑龙江气象,1999(4):34-37.
- [3] 薛晓萍,马俊,李鸿怡.基于GIS的乡镇洪涝灾害风险评估与区划技术——以山东省淄博市临淄区为例[J].灾害学,2012,27(4):71-74.
- [4] 邱黎,周秀军,朱秀红,等.基于FloodArea模型的暴雨洪涝灾害评估技术研究[J].山东气象,2016,36(3):49-54.
- [5] 霍治国,范雨娴,杨建莹,等.中国农业洪涝灾害研究进展[J].应用气象学报,2017,28(6):641-653.
- [6] ASKEW A J. Water in the international decade for natural disaster reduction IAHS Publ. no. 239, Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control, Anaheim, California, June 1996 [C]. Paris: IAHS, 1997:3-11.
- [7] 曹玮.洪涝灾害的经济影响与防灾减灾能力评估研究[D].长沙:湖南大学,2013.
- [8] 赵秀兰.近50年登陆我国热带气旋时空特征及对农业影响研究综述[J].海洋气象学报,2019,39(4):1-11.
- [9] YOSHIDA S. Physiological aspects of grain yield [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1972, 23:437-464.
- [10] GANJI Z, SHOKOOHI A, SAMANI J M V. Developing an agricultural flood loss estimation function (case study: rice) [J]. Nat Hazards, 2012, 64(1):405-419.
- [11] KAR G, SAHOO N, KUMAR A. Deep-water rice production as influenced by time and depth of flooding on the east coast of India [J]. Arch Agron Soil Sci, 2012, 58(6):573-592.
- [12] 梅少华,梅金先,陈兴国,等.洪涝灾害对水稻生产的影响评估及抗灾对策研究[J].作物杂志,2011,27(2):89-93.
- [13] 李永和,石亚月,陈耀岳.试论洪涝对水稻的影响[J].自然灾害学报,2004,13(6):83-87.
- [14] 蔡波,胡凯,傅青.气象灾害对江西省不同季水稻产量

- 影响的灰色关联分析[J]. 广东农业科学, 2017, 44(7):1-7.
- [15] 谢彦, 张茂文, 刘许生, 等. 洪涝对早、中稻生产的影响调查与研究结果简报[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9):281-286.
- [16] 宁金花, 陆魁东, 霍治国, 等. 拔节期淹涝胁迫对水稻形态和产量构成因素的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7):1818-1825.
- [17] 刘健. 关键生育期淹涝胁迫对水稻生长的影响及应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [18] 邵长秀, 潘学标, 李家文, 等. 不同生育阶段洪涝淹没时长对水稻生长发育及产量构成的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3):125-133.
- [19] 高德友, 赵新华, 段祥茂, 等. 抽穗期洪涝对水稻产量及其构成因素的影响[J]. 耕作与栽培, 2001(5):31, 47.
- [20] 郑丽娜. 近 55 a 中国西北地区夏季降水的时空演变特征[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2):50-59.
- [21] 姜丽霞, 朱海霞, 闫敏慧, 等. 黑龙江省主汛期异常降水变化及其与洪涝的关系研究[J]. 灾害学, 2019, 34(2):1-6.
- [22] LI J F, CHEN Y Q D, ZHANG L, et al. Future changes in floods and water availability across China: Linkage with changing climate and uncertainties[J]. J Hydrometeorol, 2016, 17(4):1295-1314.
- [23] 于艳梅, 李芳花, 连萍, 等. 淹涝胁迫对拔节期水稻生长影响的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):240-244.
- [24] 王矿, 王友贞, 汤广民. 水稻在拔节孕穗期对淹水胁迫的响应规律[J]. 中国农村水利水电, 2016(9):81-87.
- [25] 于艳梅, 李芳花, 姜丽霞, 等. 不同淹水处理对寒地水稻生长规律及产量影响的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3):249-253.
- [26] 邵玺文, 张瑞珍, 齐春艳, 等. 拔节孕穗期水分胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(3):237-241.
- [27] 成添, 胡继超, 林子静. 淹涝胁迫对水稻干物质分配及产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(5):689-693.