

姜丽霞, 闫敏慧, 翟墨, 等. 关键生育期淹涝胁迫对黑龙江省水稻的影响[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 128–134. [JIANG Lixia, YAN Minhui, ZHAI Mo, et al. Effects of Waterlogging Stress on Japonica Rice During Critical Growth Period in Heilongjiang Province [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 128–134. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.024.]

关键生育期淹涝胁迫对黑龙江省水稻的影响^{*}

姜丽霞¹, 闫敏慧², 翟墨¹, 闫平¹, 韩俊杰¹, 何锋¹, 王铭¹, 于艳梅³

(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. 黑龙江省气象服务中心, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 2019年在黑龙江省庆安县选用龙稻18、绥粳18两个水稻品种进行孕穗期淹水试验, 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(3d、7d)共12个淹水处理, 测定淹水前后的分蘖数、株高及收获后的结实率、穗结实粒数、千粒重及产量等。结果表明: 水稻淹水后, 分蘖数与对照相比呈减少趋势, 总体上, 随着淹水深度加大、淹水历时加长, 水稻分蘖数减少幅度加大; 水稻受淹后与淹水前相比, 株高的增长率高于对照增长率, 总体表现为淹水深度愈深、淹水历时愈长, 水稻株高增长率愈大, 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刺激作用; 不同淹涝胁迫均导致水稻减产, 全淹没7d减产最严重, 龙稻18结实率、穗结实粒数仅68%、72粒, 比对照明显偏低, 减产率达66%, 而绥粳18结实率、穗结实粒数、千粒重更是分别低至59%、42粒、17.5g, 远低于对照, 导致减产率高达81%, 淹水深度1/3h、2/3h、3/3h处理的两个品种平均减产率依次为39%、47%、62%, 淹水持续3d、7d的平均减产率分别为43%、56%, 可见随着淹水深度加深、淹水历时加长, 水稻减产幅度加大; 淹涝胁迫对两个供试水稻品种生长和产量的影响程度存在差异, 比较而言, 淹涝胁迫对绥粳18的影响重于龙稻18。

关键词: 水稻; 淹涝胁迫; 关键生育期; 产量; 黑龙江

中图分类号: P49; P429; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0128-07
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.024

随着气候变暖和生产水平的提高, 北方水稻种植规模日益增大。处于中国北方寒区的黑龙江省境内两大平原地势平坦, 水系丰富, 加之雨热同季的气候, 使一季稻生产具备明显优势, 因此该区域目前已发展成为中国最大的一季稻种植区, 2017–2018年水稻年总产量均居全国首位, 占全国稻谷总产量的12.7%~13.3%, 可见其在保障国家粮食安全中具有举足轻重的地位。但由于黑龙江省所处纬度较高, 受西风带环流系统和副热带环流系统交替影响, 夏季大雨、暴雨等异常降水集中, 较易引发洪涝灾害并造成水稻大幅度减产^[1-3], 因此研究洪涝灾害对黑龙江省水稻的影响在防灾减灾和保障国家粮食安全中具有重要意义。

洪涝灾害及其对农业的影响早已引起国内外学术界的关注和重视^[4-6], 许多专家学者先后在洪涝变化特征^[7-8]、监测预报^[9-10]、风险区划^[11-12]、影响评估^[13-15]等方面进行了大量探索性研究, 所用方法多为数理统计、模型模拟、遥感监测、胁迫试验等。研究表明, 在1970–2014年

间, 中国洪涝灾害成灾率较高, 与干旱、风雹、低温冷害等比较, 洪涝灾害对粮食总产量影响最为明显, 且成灾大于受灾^[16]。诸多研究表明洪涝灾害对水稻生产极为不利, 常导致水稻分蘖推迟、生育期延长, 或幼穗坏死、花粉破坏而减产^[17], 而移栽期强降雨所引发的涝害则使印度水稻种植面积损失、生育期不足而导致产量损失^[18]。从淹涝胁迫试验结果来看, Gouranga等^[19]研究发现, 淹水深度增加, 水稻有效分蘖数减少, 最大降幅达48%, Asagi等^[20]试验表明, 在田间和盆栽试验中, 移栽30d开始淹水的水稻根、茎、叶和穗的干重均显著高于移栽10d开始淹水的水稻。淹水使水稻绿叶数呈减少趋势, 绿叶数与淹水持续时间呈负相关关系^[21], 分蘖期淹没超过6d死苗率在80%以上, 且不能完全恢复生长^[22], 抽穗前后水稻受淹影响也较大, 淹没时间5~6d时, 产量大幅度下降^[23]。

黑龙江省几种易发灾害中洪涝灾害的农业损失率最高, 达59.2%^[24], 且该省严重洪涝区松花

^{*} 收稿日期: 2020-04-03 修回日期: 2020-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671575); 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); 东北区域气象中心科技创新联合攻关项目(2019QYLH3)

第一作者简介: 姜丽霞(1972-), 女, 吉林德惠人, 正研级高级工程师, 主要从事应用气象、气候资源和气候变化的相关研究。

E-mail: hljlxs@163.com

江及其支流沿岸的大庆市、佳木斯市和哈尔滨市等地恰为水稻主产区^[25], 加之未来黑龙江省江河区域洪涝发生呈增加趋势^[26], 因此水稻生产遭受洪涝灾害威胁及影响的风险明显加大。纵观国内以往关于水稻洪涝影响的研究, 多集中于南方水稻, 北方寒区水稻的相关报道仍较少见。基于此, 采用淹涝胁迫试验, 在水稻关键生育期进行淹水处理, 从水稻分蘖数、株高、产量等因子入手, 分析研究淹涝胁迫对黑龙江省水稻的影响, 以期为北方寒区水稻安全生产以及藏粮于地、藏粮于技的战略实施提供气象参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2019 年, 在黑龙江省庆安县灌溉试验站(127°30'04"E, 46°52'41"N)开展水稻淹涝胁迫模拟试验, 供试水稻品种为龙稻 18、绥粳 18, 两个品种均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 25 日移栽至试验区内, 每个测桶移栽 3 穴, 每穴 3~5 株。至水稻孕穗期进行淹水处理, 淹水时间为 7 月 18 日(移栽后 53 d)。每个品种淹水处理均设为 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 $1/3 h \sim 3 d$, 依次类推(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, 长和宽分别为 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。

1.2 数据测量与处理分析

试验期间, 对两个品种水稻分蘖数、株高进行观测, 观测样本随机取样, 样本数量均为 3 穴/次, 具体观测次数、观测时间见表 2。收获后, 调查统计结实率、穗结实粒数、千粒重等产量构成要素。利用数理统计方法对各项观测数据进行统计分析。为方便分析, 本文规定龙稻 18、绥粳 18 分蘖数的变化率分别记为 $LD-RT$ 、 $SJ-RT$, 株高变化率分别记为 $LD-RH$ 、 $SJ-RH$, 则两个品种孕穗期淹水后第一次观测的分蘖数变化率分别记作 $LD-RT_1$ 、 $SJ-RT_1$, 株高分别记作 $LD-RH_1$ 、 $SJ-RH_1$, 依次类推。

2 结果与分析

2.1 不同淹涝胁迫对水稻分蘖的影响

图 1 给出了龙稻 18(图 1a)、绥粳 18(图 1b)孕穗期不同淹水处理及对照分蘖数, 图 1a、图 1b 中虚竖线表示移栽日数所对应的淹水日。由图 1 可见, 两个品种不同淹涝胁迫下的水稻分蘖数与对照组分蘖数呈一致变化, 基本呈先增加后减少的趋势, 株分蘖数随时间在 5~30 个之间波动, 不同处理间略存在差异。淹水后, 两个品种分蘖数变化特征相似, 均表现为淹水处理的分蘖数低于对照, 结合表 3 可见, 各处理与对照组相比, 分蘖数减少率为 3.3%~42.4%, $2/3 h \sim 7 d$ 处理的 $SJ-RT_2$ (移栽 76 d)降低最多, $SJ-RT_1$ (移栽 67 d)降低最少。最后一次观测值显示, 两个品种各处理分蘖数减少幅度均在 13.2% 以上(表 3), 淹水深度 $1/3 h$ 、 $2/3 h$ 、 $3/3 h$ 龙稻 18 的减少率分别为 19.0%、22.0%、24.0%, 绥粳 18 分别为 27.9%、39.0%、16.9%; 淹水历时 3 d、7 d 龙稻 18 的减少率分别为 18.7%、24.7%, 绥粳 18 分别为 23.0%、32.8%。另从最后一次观测值平均减少率看, 龙稻 18、绥粳 18 分别为 21.7%、27.9%。

表 1 水稻孕穗期淹涝试验设计

| 水稻品种 | 淹水日期 | 试验处理 | 试验因素水平 | |
|-------|------------------------|------------------|-----------------------|--------|
| | | | 淹水深度 | 淹水历时/d |
| 龙稻 18 | 7 月 18 日 (移栽后 53 d) | $1/3 h \sim 3 d$ | 淹水 $1/3$ 株高(水深 20 cm) | 3 |
| | | $1/3 h \sim 7 d$ | | 7 |
| | | $2/3 h \sim 3 d$ | 淹水 $2/3$ 株高(水深 40 cm) | 3 |
| | | $2/3 h \sim 7 d$ | | 7 |
| | | $3/3 h \sim 3 d$ | 淹水 $3/3$ 株高(水深 60 cm) | 3 |
| | | $3/3 h \sim 7 d$ | | 7 |
| 绥粳 18 | 7 月 18 日 (移栽后 53 d) | $1/3 h \sim 3 d$ | 淹水 $1/3$ 株高(水深 20 cm) | 3 |
| | | $1/3 h \sim 7 d$ | | 7 |
| | | $2/3 h \sim 3 d$ | 淹水 $2/3$ 株高(水深 40 cm) | 3 |
| | | $2/3 h \sim 7 d$ | | 7 |
| | | $3/3 h \sim 3 d$ | 淹水 $3/3$ 株高(水深 60 cm) | 3 |
| | | $3/3 h \sim 7 d$ | | 7 |

表 2 观测项目信息一览表

| 观测要素 | 观测次数/次 | 观测时间/月·日 |
|------|--------|---|
| 分蘖数 | 12 | 6·05、6·11、6·16、6·21、6·26、7·01、7·06、7·11、7·16、8·01、8·10、8·29 |
| 株高 | 14 | 6·05、6·11、6·16、6·21、6·26、7·01、7·06、7·11、7·16、7·21、7·26、8·01、8·10、8·29 |

表 3 孕穗期不同淹水处理淹水后龙稻 18、绥梗 18 分蘖数与对照比较的变化率/%

| 处理 | 龙稻 18 | | | 处理 | 绥梗 18 | | |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | LD-RT ₁ (移栽 67 d) | LD-RT ₂ (移栽 76 d) | LD-RT ₃ (移栽 95 d) | | SJ-RT ₁ (移栽 67 d) | SJ-RT ₂ (移栽 76 d) | SJ-RT ₃ (移栽 95 d) |
| 1/3 h~3 d | -23.6 | -25.5 | -22.0 | 1/3 h~3 d | -6.7 | -15.2 | -19.1 |
| 1/3 h~7 d | -16.4 | -17.6 | -16.0 | 1/3 h~7 d | -6.7 | -28.8 | -36.8 |
| 2/3 h~3 d | -20.0 | -19.6 | -14.0 | 2/3 h~3 d | -28.3 | -39.4 | -36.8 |
| 2/3 h~7 d | -30.9 | -29.4 | -30.0 | 2/3 h~7 d | -3.3 | -42.4 | -41.2 |
| 3/3 h~3 d | -18.2 | -19.6 | -20.0 | 3/3 h~3 d | -13.3 | -19.7 | -13.2 |
| 3/3 h~7 d | -27.3 | -27.5 | -28.0 | 3/3 h~7 d | -25.0 | -30.3 | -20.6 |

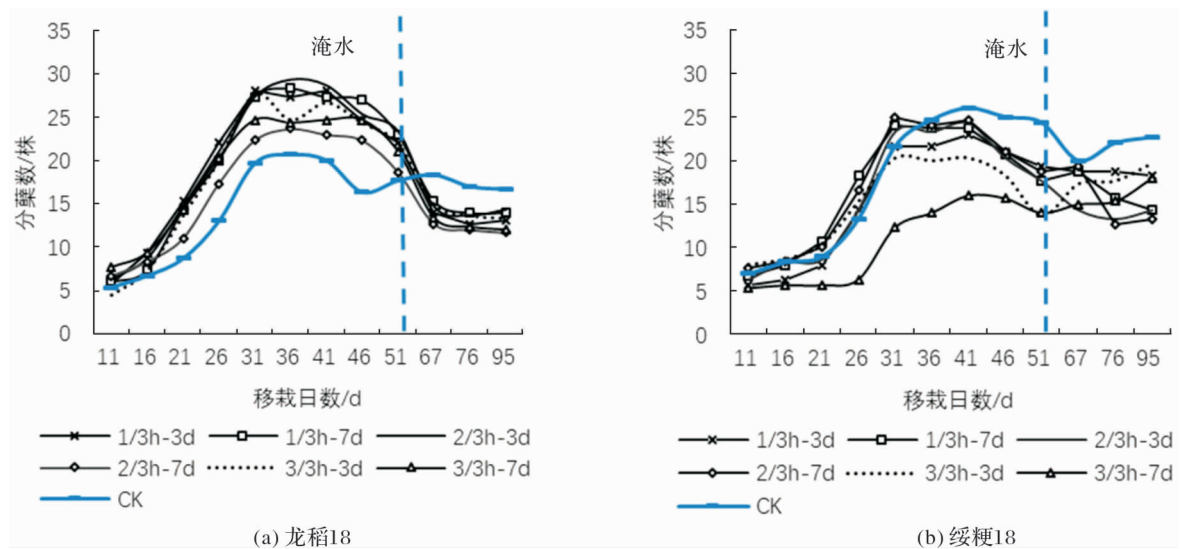


图 1 孕穗期不同淹水处理条件下龙稻 18、绥梗 18 分蘖数与对照比较

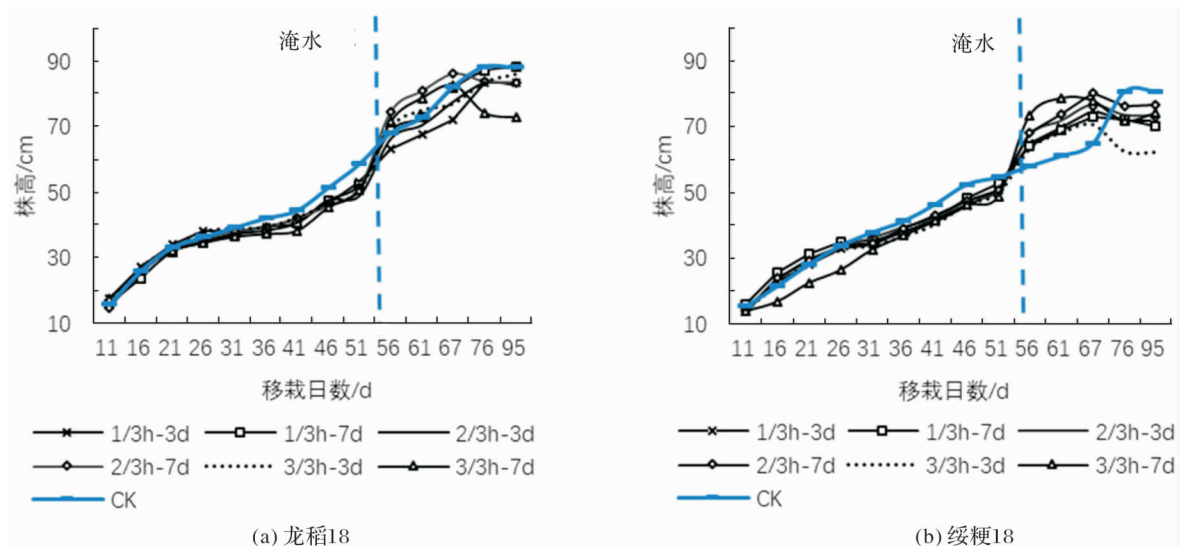


图 2 孕穗期不同淹水处理条件下龙稻 18、绥梗 18 株高与对照比较

2.2 不同淹涝胁迫对水稻株高的影响

图 2 给出了龙稻 18(图 2a)、绥梗 18(图 2b)孕穗期不同淹水处理及对照株高,图 2a、图 2b 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株高与对照组株高变化趋势基本相同,株高略存在差异,移栽 31~51 d 期间(移栽 53 d 为淹水日),两个品种对照组株高均高于各淹水处理的株高,淹水后,移栽 56~67 d

龙稻 18 部分淹水处理的株高高于对照,偏高 0.2%~11.0%,另有部分处理株高低于对照,而绥梗 18 则 6 个淹水处理的株高均高于对照,偏高 9.0%~28.7%。移栽 76 d、95 d,各处理株高略有下降。

进一步比较分析两个品种孕穗期淹水前后株高的变化发现,淹水后 3 d,各处理水稻株高的增长率均高于对照增长率(表 4),其中龙稻 18 比对

照增长率偏高 2.8% ~ 28.9%, 绥粳 18 偏高 14.9% ~ 44.6%, 细致比较可见, 淹水深度 1/3 h、2/3 h、3/3 h 龙稻 18 的增长率分别为 25.2%、40.2%、39.1%, 绥粳 18 分别为 24.6%、33.5%、39.0%; 淹水历时 3 d、7 d 龙稻 18 的增长率分别为 30.6%、39.1%, 绥粳 18 分别为 29.5%、35.2%。从平均增长率看, 龙稻 18、绥粳 18 分别为 34.9%、32.4%。

2.3 不同淹涝胁迫对水稻产量的影响

表 5 列出了孕穗期不同淹涝胁迫条件下龙稻 18、绥粳 18 产量的变化。由表 5 可见, 两个品种各淹水处理产量构成要素中的穗结实粒数均比对照组明显偏少, 偏少 11 ~ 33 粒, 其中全淹没 7 d (3/3 h ~ 7 d) 的穗结实粒数下降显著, 分别仅为 72 粒、42 粒, 比对照偏少 29 粒、33 粒。各淹水处理的结实率、千粒重与对照比较或多或少, 但全淹没 7 d 明显偏低, 龙稻 18 结实率、千粒重分别偏低 22%、3.2 g; 绥粳 18 分别偏低 29%、10.5 g, 从平均结实率、平均千粒重来看, 龙稻 18 淹水处理分别为 85%、23.0 g, 绥粳 18 分别为 86%、24.3 g, 可见两个品种的结实率、千粒重差异不大。由产量表现可以看到, 两个品种 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 22% ~ 81%, 龙稻 18 淹水深度 1/3 h 持

续 7 d (1/3 h ~ 7 d) 处理减产幅度最小, 绥粳 18 全淹没 7 d (3/3 h ~ 7 d) 减产最严重, 减产率高达 81%, 几近绝产。

对不同淹涝条件下龙稻 18、绥粳 18 产量进行细致比较 (表 5), 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 处理龙稻 18 的平均减产幅度依次为 31%、36%、51%, 绥粳 18 的平均减产幅度依次为 48%、58%、74%, 可见全淹没对水稻产量的负效应影响最大。②总体表现为淹涝时间越长、减产越严重的趋势。由表 5 可见, 龙稻 18 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%、30%, 绥粳 18 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 23%、15%、15%。虽龙稻 18 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 36%、43%, 绥粳 18 则分别为 51%、69%, 可见两个品种淹涝 7 d 的减产率较 3 d 分别偏低 7%、18%。③不同品种遭受淹涝胁迫, 水稻减产幅度存在差异, 龙稻 18 各淹水处理平均减产率为 39%, 而绥粳 18 为 60%, 另外, 如上分析结果也显示, 在不同淹水深度、不同淹水历时下龙稻 18 减产率均低于绥粳 18。

表 4 龙稻 18、绥粳 18 的不同淹水处理及对照淹水前后株高比较

| | 龙稻 18 | | | 绥粳 18 | | |
|-------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| | 淹水前株高 A/cm (移栽 51 d) | 淹水后株高 B/cm (移栽 56 d) | $\frac{(B-A)}{A} \times 100\%$ | 淹水前株高 A/cm (移栽 51 d) | 淹水后株高 B/cm (移栽 56 d) | $\frac{(B-A)}{A} \times 100\%$ |
| 1/3 h ~ 3 d | 53.0 | 63.0 | 18.9 | 50.7 | 64.8 | 28.0 |
| 1/3 h ~ 7 d | 52.2 | 68.7 | 31.6 | 52.7 | 63.8 | 21.2 |
| 2/3 h ~ 3 d | 49.0 | 66.4 | 35.5 | 50.3 | 67.2 | 33.4 |
| 2/3 h ~ 7 d | 51.5 | 74.7 | 45.0 | 50.8 | 67.9 | 33.6 |
| 3/3 h ~ 3 d | 50.8 | 69.8 | 37.4 | 49.8 | 63.3 | 27.1 |
| 3/3 h ~ 7 d | 50.8 | 71.6 | 40.8 | 48.5 | 73.2 | 50.9 |
| CK | 58.7 | 68.2 | 16.1 | 54.6 | 58.0 | 6.3 |

表 5 孕穗期不同淹水处理下龙稻 18、绥粳 18 的产量变化

| 品种 | 处理 | 结实率/% | 穗结实粒数 | 千粒重/g | 产量/(kg/hm ²) |
|-------|-------------|-------|-------|-------|--------------------------|
| 龙稻 18 | 1/3 h ~ 3 d | 86 | 81 | 23.7 | 5344 |
| | 1/3 h ~ 7 d | 93 | 83 | 25.1 | 6810 |
| | 2/3 h ~ 3 d | 83 | 84 | 23.8 | 5935 |
| | 2/3 h ~ 7 d | 93 | 83 | 23.7 | 5327 |
| | 3/3 h ~ 3 d | 86 | 90 | 21.8 | 5620 |
| | 3/3 h ~ 7 d | 68 | 72 | 20.0 | 2955 |
| | CK | 90 | 101 | 23.2 | 8752 |
| 绥粳 18 | 1/3 h ~ 3 d | 93 | 58 | 27.0 | 6645 |
| | 1/3 h ~ 7 d | 94 | 45 | 27.5 | 4224 |
| | 2/3 h ~ 3 d | 96 | 54 | 28.2 | 5205 |
| | 2/3 h ~ 7 d | 92 | 45 | 26.3 | 3626 |
| | 3/3 h ~ 3 d | 79 | 47 | 19.4 | 3534 |
| | 3/3 h ~ 7 d | 59 | 42 | 17.5 | 1961 |
| | CK | 88 | 75 | 28.0 | 10449 |

3 讨论

本文利用黑龙江省主栽水稻品种龙稻 18、绥粳 18, 基于水稻关键生育期—孕穗期开展淹水模拟试验, 探索研究淹涝胁迫对黑龙江省水稻生长和产量的影响, 从水稻分蘖数变化来看, 淹水后两个品种的分蘖数相比对照均呈减少状态, 最后一次观测的分蘖数平均减少幅度在 20% ~ 30% 之间, 可见淹涝胁迫对水稻分蘖有明显影响, 这与 Gouranga 等^[19]、于艳梅等^[27]的分析一致。两个品种的株高淹水后 3 d 较淹水前 2 d 的增长率均高于同期对照的增长率, 且淹水后的 14 d 里(包括淹水持续的 3 d 或 7 d 及淹水后出水的时间), 淹水处理的株高多数高于对照组。以往大量研究表明, 淹水处理使水稻生长加快, 出水后株高比对照组均呈现不同程度的增加趋势^[28-29], 本文株高淹水后的变化特征与之一致。可见, 适度的淹涝胁迫对水稻生长具有刺激作用。

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^[22,30], 可见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^[22], 本文淹涝胁迫试验结果与上述分析情况相符, 造成两个水稻品种减产的主要产量构成因素即为穗结实粒数, 由表 5 可见, 龙稻 18 淹水处理下的平均穗结实粒数较对照偏少 19 粒, 绥粳 18 偏少 26 粒。

在不同淹涝胁迫条件下, 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 淹水胁迫下, 水稻部分茎蘖和叶片处于被淹状态, 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, 且根部也有氧气到达, 则其对短期淹涝的消耗具有一定抵御能力, 从而对水稻生长和产量的负效应影响相对小, 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^[27]。从淹水时间来说, 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^[21,23], 形成产量能力也随之下降, 因此造成的伤害较大, 减产加重。

淹涝胁迫对不同水稻品种生长和产量的影响存在差异, 从本文试验结果可以看出, 两个品种孕穗期受淹后, 淹涝胁迫对分蘖数、株高、产量的影响趋势虽一致, 但程度有所不同, 比较而言, 两个品种分蘖数减少幅度、淹水后较淹水前的株高增长率以及产量下降幅度分别表现为龙稻 18 < 绥粳 18、龙稻 18 > 绥粳 18、龙稻 18 < 绥粳 18, 这在一定程度上可以说明孕穗期淹涝胁迫对绥粳 18 的影响重于龙稻 18。

4 结论

(1) 水稻在孕穗期淹涝胁迫条件下, 分蘖数与对照相比呈减少趋势, 总体上, 淹水深度愈深、淹水历时愈长, 水稻分蘖数减少幅度愈大。水稻植株生长则对淹涝胁迫具有一定适应性, 水稻受淹后与淹水前相比, 株高的增长率高于对照, 且总体上表征为随着淹水深度加大、淹水历时加长, 水稻株高增长率加大的态势, 可见, 适度的淹涝胁迫对水稻植株生长具有刺激作用。

(2) 水稻受淹后, 产量形成受到负效应影响, 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, 龙稻 18 全淹没 7 d 结实率、穗结实粒数分别为 68%、72 粒, 分别较对照偏低 22%、29 粒, 而绥粳 18 更是 3 项数值均较低, 分别为 59%、42 粒、17.5 g, 依次较对照偏少 29%、29 粒、10.5 g。

(3) 淹涝胁迫条件下, 与对照组比较, 淹水深度 1/3 h、2/3 h、3/3 h 处理龙稻 18 的平均减产率依次为 31%、36%、51%, 绥粳 18 依次为 48%、58%、74%, 两个品种平均则依次为 39%、47%、62%; 淹水持续 3 d、7 d 龙稻 18 的平均减产率分别为 36%、43%, 绥粳 18 分别为 51%、69%, 两个品种平均则分别为 43%、56%, 由此可见, 淹涝胁迫导致水稻减产, 在淹水深度和淹水历时两个因素水平上, 减产率均表现为 1/3 h < 2/3 h < 1 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) 淹涝胁迫对两个供试水稻品种生长和产量的影响程度存在差异, 淹水后较淹水前的株高增长率龙稻 18 大于绥粳 18, 而分蘖数减少幅度和产量下降幅度则恰好相反, 这在一定程度上可以说明孕穗期淹涝胁迫对绥粳 18 的影响重于龙稻 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, 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] 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.
- [4] ASKEW A J. Water in the international decade for natural disaster reduction[C]//Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control. UK: IAHS Publ, 1997.
- [5] 霍治国, 范雨娴, 杨建堂, 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] 段德寅, 汪扩军, 陆魁东. 近 40 年湖南洪涝灾害的演变趋势及其成因[J]. 气象, 1999, 25(6): 42–47.
- [7] 顾静, 黄河清, 周杰, 等. 泾河流域 1644–2003 年洪涝灾害和洪水沉积特征研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 16–20.
- [8] JI Y H, ZHOU G S, WANG S D, et al. Increase in flood and drought disasters during 1500–2000 in Southwest China[J]. Natural Hazards, 2015, 77(3): 1853–1861.
- [9] 汪权方, 张雨, 汪倩倩, 等. 基于视觉注意机制的洪涝淹没区遥感识别方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 296–304.
- [10] 李吉顺, 王昂生. 重大洪涝灾害综合预测研究[J]. 中国减灾, 2000, 10(4): 40–44.
- [11] 徐玉霞. 基于 GIS 的陕西省洪涝灾害风险评估及区划[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 103–108.
- [12] 杨建莹, 霍治国, 吴立, 等. 西南地区水稻洪涝灾害风险评估与区划[J]. 中国农业气象, 2016, 37(5): 564–577.
- [13] 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(2): 89–93.
- [14] 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.
- [15] MUHAMMAD Shakil Hossain. 洪涝灾害对水稻生产的影响以及与孟加拉国气候变化(降水)的关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [16] 于小兵, 卢逸群, 吉中会, 等. 近 45 a 来我国农业气象灾害变化特征及其对粮食产量的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1700–1710.
- [17] 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.
- [18] ASADA H, MATSUMOTO J. Effects of rainfall variation on rice production in the Ganges–Brahmaputra Basin[J]. Climate Research, 2009, 38(3): 249–260.
- [19] GOURANGA Kar, NARAYAN Sahoo, ASHWANI Kumar. Deep – water rice production as influenced by time and depth of flooding on the east coast of India[J]. Archives of Agronomy and Soil Science. 2012, 58(6): 573–592.
- [20] ASAGI N, UENO H. The effect of beginning time of flooding on the growth and yield of rice cultivated on paddy soil with white clover living mulch. [J]. Japanese Journal of Crop Science, 2009, 78(1): 27–34.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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, 2011(5): 31, 47.
- [24] 王秋京, 马国忠, 朱海霞, 等. 黑龙江省主要农业气象灾害演变特征及对水稻产量的影响[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 76–83.
- [25] 姚俊英, 朱红蕊, 南极月, 等. 基于灰色理论的黑龙江省暴雨洪涝特征分析及灾变预测[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 59–63.
- [26] LI J, CHEN Y D, ZHANG L, et al. Future changes in floods and water availability across China: Linkage with changing climate and uncertainties[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016, 17(4): 1295–1314.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.

Effects of Waterlogging Stress on Japonica Rice During Critical growth Period in Heilongjiang Province

JIANG Lixia¹, YAN Minhui², ZHAI Mo¹, YAN Ping¹, HAN Junjie¹, HE Feng¹,
WANG Ming¹, YU Yanmei³

(1. Heilongjiang Province Institute of Meteorological Science/Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco – Meteorology in Northeast China, CMA/ Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Meteorological Service Center, Harbin 150030, China; 3. Heilongjiang Provincial Hydraulic Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: In 2019, LongDao 18 and Suijing 18 of two Japonica rice varieties was planted in Qing'an County of Heilongjiang Province for the experiment of rice flooding at the booting stage, three flooding depths (1/3 plant height and 2/3 plant height, total plant height flooding) and two flooding duration (3d、7d) were respectively designed for 12 flooding treatments. During the experiment, the tiller number and the plant height before and after flooding, seed setting rate, grain number per panicle, 1000 – grain weight and yield were measured for quantity and comparative analysis. The results showed that there was a decreasing trend of the tiller number change compared with CK, On the whole, the decrease of the tiller number was the more with the deepening of waterlogging depth and the lengthening of waterlogging duration; the increase rate of plant height was higher than those of the CK, and the increase rate was the more with the deepening of waterlogging depth and the lengthening of waterlogging duration, which indicated that the moderate waterlogging stress could stimulate the growth of rice plants; Different waterlogging stress led to the reduction of Japonica rice yield, and the yield was reduced most seriously after

7 days of total submergence, the seed setting rate of Longdao 18 was only 68% and its the number of grains per ear was 72, which was significantly lower than the CK, so the yield reduction rate was 66%. However, the seed setting rate, grain number per panicle and 1000-grain weight of Suijing 18 were as low as 59%, 42 and 17.5g respectively, which were far lower than those of the CK, so the yield reduction rate was as high as 81%, and the average yield reduction rates of two rice varieties of 1/3 h, 2/3 h and 3/3 h were 39%, 47% and 62% respectively, the average yield reduction rates of 3 days and 7 days were 43% and 56% respectively, thus, it could be seen that rice yield loss was the more with the deepening of waterlogging depth and the lengthening of waterlogging duration; The effect degree of waterlogging stress on the growth and yield of the two rice varieties was different, in comparison, the effects of waterlogging stress on Suijing 18 were more serious than that on Longdao 18.

Key words: rice; waterlogging stress; critical growth period; yield; Heilongjiang

(上接第 98 页)

Compound Flooding Simulation and Prediction of Future Recurrence in Shanghai Downtown Area

HE Fangfang¹, HU Hengzhi², DONG Guangtao¹ and XU Hanqing³

(1. *Shanghai Climate Center, Shanghai 200030, China*; 2. *Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China*; 3. *East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

Abstract: The extreme strong winds, precipitation and typhoon storm surges caused by typhoon are very likely to cause flood disasters, in combining with astronomical tides, upstream water and future sea level rise will pose a serious threat to the public safety of coastal megacities. This paper uses the hydrodynamic model ICM InfoWorks to simulate the three encounters of “typhoon, torrential rain, and astronomical tide” during the “Haikui” typhoon and the four encounters of “typhoon, torrential rain, upstream water, and astronomical tide” during the “Fitow” typhoon inundation of compound flood disasters in downtown Shanghai. The results show that during the typhoon “Haikui” and “Fitow”, the flooded areas in the center of Shanghai mainly appeared in the low-lying old Shanghai area near the Huangpu River and Suzhou Creek. Then these two cases are simulated by using the Weather Research and Forecasting Model under future climate conditions obtained from one of CMIP5 GCMs by using a pseudo global warming technique. The results show that rainfall induced by these two tropical cyclones all increase dramatically under future warming climate. The flooding in the downtown area and submerged depth became much more stronger than the simulations from historical run during these two cases.

Key words: Flood disaster; hydrodynamic model ICM Info works; pseudo global warming technique; compound flood disaster simulation; Shanghai