

拔节期淹水玉米的生理性状和产量形成

周新国^{1,2}, 韩会玲^{1*}, 李彩霞², 郭树龙², 郭冬冬², 陈金平²

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 保定 071001; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002)

摘要: 为了探明夏玉米拔节期对淹水历时的响应规律, 采用大田环境下无底测坑试验, 在玉米拔节期设置不同的淹水天数(1、2、3、5、7 d), 分析了淹水历时对夏玉米生长发育、灌浆过程、物质分配及产量性状的影响。结果表明, 玉米拔节期淹水抑制玉米的营养期发育, 淹水1、2、3、5、7d的平均株高分别比非涝渍环境下玉米(CK)降低2.26%、2.26%、2.45%、11.36%和10.17%; 平均叶面积指数LAI分别降低23.79%、18.93%、13.04%、32.74%和34.27%; 玉米拔节期淹水5d以上, 植株矮而黄。在植株生理反应方面, 淹水3d后测定结果表明, 淹水1、2、3d的叶绿素质量分数比CK高, 根系活力增强, 而淹水5d和7d叶绿素质量分数和根系活力下降。玉米灌浆至乳熟期叶绿素测定结果表明, 淹水5d以上处理的叶绿素质量分数仍较CK降低10.87%, 表明受淹5d以上, 叶绿素质量分数降低并无法恢复。玉米拔节期受淹影响其后期灌浆过程中的籽粒质量, 同一时间的淹水1、2和3d与对照籽粒质量比较接近, 淹水5d较低, 淹水7d为最低。玉米穗长和穗粗随淹水历时呈减小的趋势, 但各处理间无显著差异($P<0.05$)。淹水使玉米出现较长的秃尖, 淹水1、2、3、5d的秃尖长度为CK的2倍左右, 淹水7d的秃尖长度为CK的5倍; 淹水历时越长, 玉米穗长、穗粒质量、穗质量和百粒质量的减幅就越大, 淹水1、2、3、5、7的玉米产量分别降低16.58%、16.65%、26.11%、34.32%和39.01%。玉米拔节期淹水5d以上, 严重影响玉米正常生长, 造成产量显著降低。研究结果为涝渍灾害监测和灾损快速评估以及涝渍排水标准确定提供参考。

关键词: 叶绿素; 排水; 作物; 淹水; 历时; 生长; 灌浆; 产量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.09.015

中图分类号: S276.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-09-0119-07

周新国, 韩会玲, 李彩霞, 等. 拔节期淹水玉米的生理性状和产量形成[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 119-125.

Zhou Xinguo, Han Huiling, Li Caixia, et al. Physiological characters and yield formation of corn (*Zea mays* L.) under waterlogging stress in jointing stage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 119-125. (in Chinese with English abstract)

0 引言

降雨过多或地势低洼等形成了土壤淹水或渍水, 使作物遭受奢水逆境是较为严重的非生物胁迫隐性灾害之一。近年随着全球环境的不断恶化, 生态结构破坏, 全球气候异常, 降雨分布极不均衡, 部分地区水旱灾害连年发生。淹水抑制根系的正常生长与吸收行为^[1-2], 导致植株体内激素平衡破坏和营养失衡, 改变了生物量分配、生长受到抑制^[3-5]。在土壤淹水条件下, 淹水时间影响叶片气孔活动, 抑制作物蒸腾和光合特性^[6], 植株形态及生理产生自适应性^[7-8], 如形成不定根和通气组织、加快地上部生长等以保持在淹水逆境下的生存能力, 叶绿素

含量降低, 丙二醛和游离氨基酸含量升高^[9], 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase)、过氧化氢酶(catalase)和过氧化酶(Peroxidase)活性下降^[10-11], 叶面积指数显著降低, 穗粒质量、百粒质量和穗粒数明显下降^[12], 经济产量明显受到影响^[13-14], 对农业生产造成极大危害。为了减轻淹水对农业生产的危害, 人们通过生物学技术培育出较强耐淹能力的作物品种, 但淹水灾害受地域、土壤、植物自身等因素影响非常大, 需要开展多方面研究, 上述研究结果多数在盆栽条件下进行, 其试验环境与大田实际情况差异很大, 特别对产量形成过程及产量性状的影响方面^[15]。在河南地区, 玉米种植面积约 $2 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[16], 玉米生长存在阶段性受涝^[17], 作物产量受到严重影响^[18], 近年来有关涝渍胁迫下作物生长及产量方面的研究并不鲜见, 但基本在桶栽、盆栽等条件下进行, 与大田环境相差甚远, 缺乏指导生产的适宜排水指标。拔节期是玉米生长的重要时期, 这一时期不但是农业涝渍灾害最易发生的时期, 而且是玉米一生中对于涝渍灾害反应比较敏感的关键时期。因此, 本试验在与大田环境较为接近的

收稿日期: 2013-09-25 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077, 201203032)

作者简介: 周新国(1970-), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士研究生, 主要从事农业高效用水与环境效应研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所排水技术研究室, 453002。Email: zhouxg01@tom.com

*通信作者: 韩会玲(1965-), 女, 河北人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。保定 河北农业大学城乡建设学院, 071001。Email: cjhhi@hebau.edu.cn

小区中进行,拟通过夏玉米拔节期受涝胁迫对其生长及产量的响应研究,为田间排水管理以及作物耐涝能力评价提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在河南省商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站进行(34°35.222'N, 115°34.515'E, 海拔 50.2 m),位于淮河以北,属暖温带半湿润季

风气候,土壤类型为潮土,0~45 cm 土壤为壤土,45~70 cm 为壤质黏土,80~100 cm 为黏土层。试验点 0~100 cm 平均田间持水量 27.09%,平均土壤容重 1.46 g/cm³。土壤基本肥力参数:全氮 0.78 g/kg,碱解氮 56.4 mg/kg,速效磷 10.5 mg/kg,速效钾 52.6 mg/kg。年均降雨量 700 mm 左右,2011~2013 年连续 3 a 降雨量分布情况见图 1。玉米生长期间地下水位较高,为 60~200 cm。

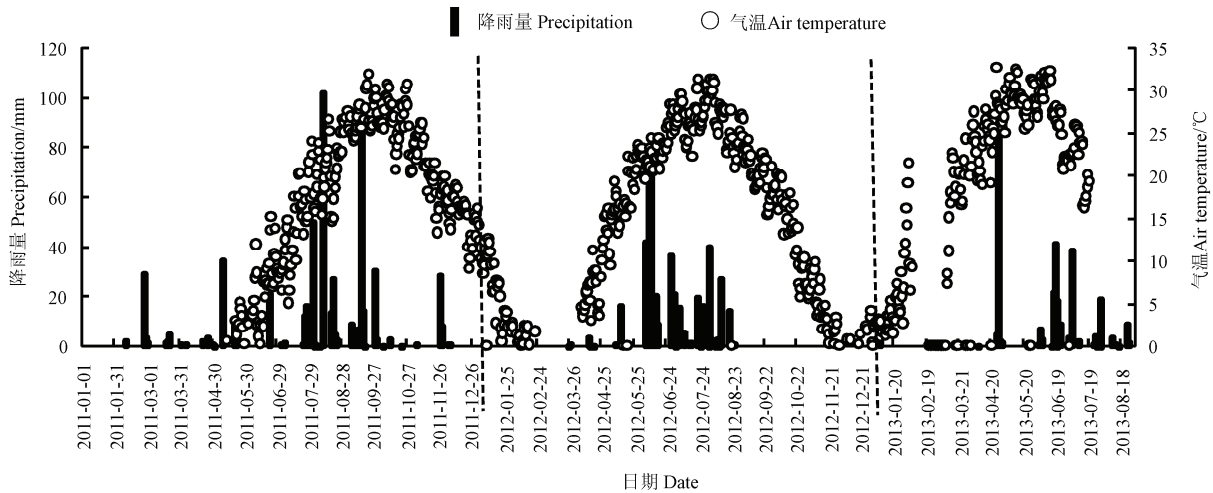


图 1 商丘 2011-2013 年的降雨量及气温分析

Fig.1 Rainfall and temperature analysis of 2011-2013 years in Shangqiu

由近 3a 的商丘降雨量可知,从每年的 5 月下旬开始出现较大的降雨,7~9 月为降雨频率最高和降雨量最大的时段(图 1)。在玉米生长期,暴雨和大暴雨也时有发生,玉米拔节期正处于暴雨级别较高的时期,此时的气温也相对较高(30℃左右),玉米受涝渍灾害的可能性较大。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,3 次重复。试验在大田环境下小区中进行,小区采用厚塑料膜与周围隔离,塑料膜埋深 60 cm,地上留有 20 cm,外围垒土坝,小区面积 3 m×3 m。每小区安有地下水位观测井。供试玉米品种为浚单 20,播期为 2012 年 6 月 6 日,种植密度为 6 6670 株/hm²,9 月 28 日收获。在玉米拔节期施象牌复合肥 750 kg/hm²(含 N 30%、P₂O 6%),旱季的田间灌水下限为 70%~75%田持,灌至 95%田持。淹水试验在玉米拔节期(7 月 8 日~8 月 10 日)进行,淹水开始于 7 月 18 日,玉米拔节期淹水处理包括:J1(淹水 1 d)、J2(淹水 2 d)、J3(淹水 3 d)、J5(淹水 5 d)、J7(淹水 7 d)和不受旱涝影响的对照(control check, CK)处理,共 6 个处理,淹水期间保持地面以上存有 10~15 cm 的水层,大田小区每 3 小时补一次水,昼夜不间断

补水,每次补水至地面以上存有 10~15 cm 水层。淹水结束,土壤水分由自然渗漏和人工抽排解除淹水胁迫,地下水位由观测井量测和控制,在 24 h 内降至 0.8 m 以下。

1.3 研究方法

1) 作物生长及生理性状:由直尺量测株高和绿叶叶面积指数,每处理选长势均匀的 3 株,每 7d 观测一次;在玉米成熟期,测定干物质分配情况。

在玉米受淹前后,取功能叶叶片观测叶绿素含量,测定参照 Lichtenthaler 法,丙二醛(malondialdehyde MDA)含量采用双组分分光光度计法计算;TTC(triphenyl tetrazolium chloride)法测定根系活力。

2) 玉米收获期各小区单打测产。对小区中间 2 行取样观测穗长、秃尖长、穗周长、行粒数、穗行数、百粒质量。

3) 玉米灌浆期,每小区选 3 穗,用于籽粒取样,每 3 天取样一次,每次在穗中部取 10 粒,直至籽粒完熟、粒质量不再增加。于 105℃杀青 30 min,然后 80℃烘干至恒质量。

4) 干物质分配:在玉米成熟期每小区取 3 株玉米,从植株根茎部剪下,将叶片、茎秆、叶鞘和

苞叶分开放入 105℃烘箱中杀青 30 min，然后 80℃烘干至恒质量，分别称取各部分质量。

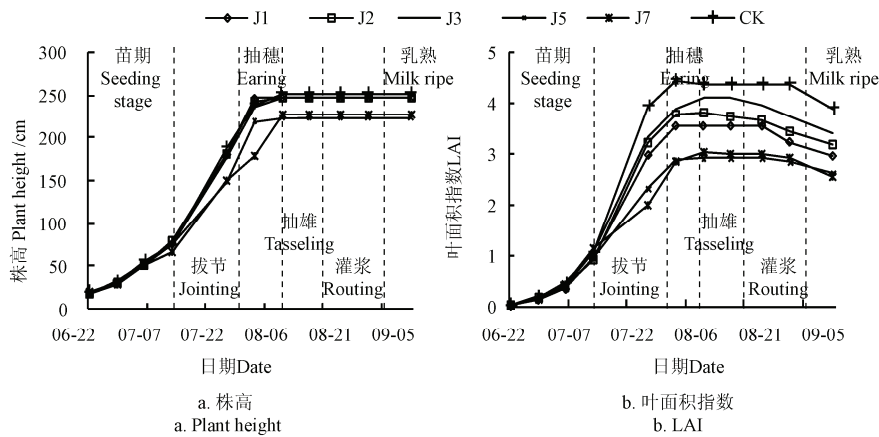
5) 采用最小显著极差法 (LSR 法, least significant difference) 进行数据显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同淹水历时下玉米生长发育及生理性状

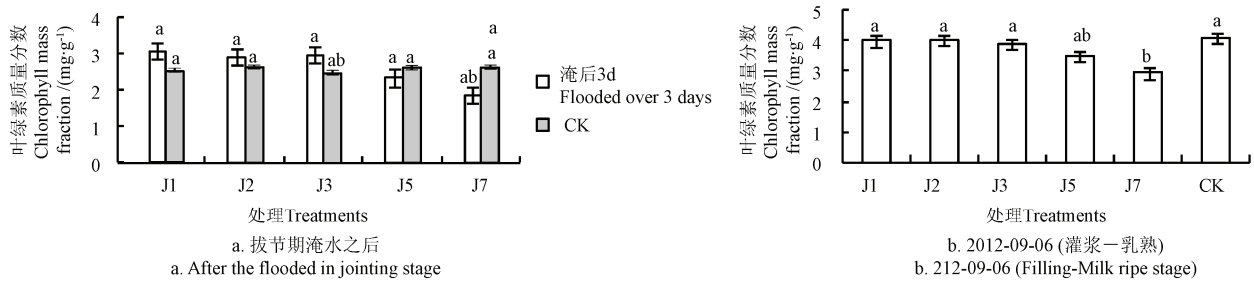
拔节期淹水处理后，淹水 1~3 d 处理玉米株高与对照无明显差异 ($P<0.05$)，淹水 5 d 以上则明显抑制玉米株高。在玉米乳熟阶段各处理的株高从高到低的排序为：CK、J1、J2、J3、J7、J5，玉米营养生长期结束，平均株高分别达到 252.7、247、247、246.5、227、224 cm，拔节期淹水 1~7 d，玉米株高降低 2.26%~11.36% (图 2a)。不同淹水历时玉米叶面积指数不同，拔节期淹水抑制了玉米叶

面积发展，淹水 5 d 以上对 LAI 的抑制最为严重(图 2b)，至玉米成熟期，CK、J3、J2、J1、J5、J7 的玉米绿叶 LAI 分别为 3.91、3.40、3.17、2.98、2.63、2.57，淹水处理的 LAI 比对照降低了 13.04%~34.27% (图 2b)。由此看出，玉米拔节期淹水抑制了地上部植株的生长发育，玉米拔节期淹水对株高的影响随淹水历时的增加而增大，淹水胁迫解除后植株的补偿生长能力较弱，其株高不同程度地低于对照 (图 2a)。刘祖贵等^[15]通过玉米拔节期的不同淹水历时试验表明，玉米拔节期受淹后株高随着淹水历时的增加受到的影响程度越大，LAI 较对照降低 14.81%~46.56%，淹水 3 d 以上的 LAI 与对照差异显著 ($P<0.05$)；冯跃华等^[14]通过拔节期夏玉米的淹涝试验结果亦显示，淹水超过 4 d，叶面积指数显著降低。其试验结果与本文基本一致。



注：J1、J2、J3、J5、J7 分别为淹水 1 d、2 d、3 d、5 d 和 7 d；CK 为对照，即不受旱涝影响。
Note: J1, J2, J3, J5 and J7 is flooded 1 d, 2 d, 3 d, 5 d and 7 d; CK is control, not the drought and waterlogging stress

图 2 不同受淹历时下玉米株高和叶面积指数(LAI)变化
Fig.2 Change of average plant height and LAI(leaf area index) of maize under different waterlogging days



注：图中同一处理的不同字母表示显著性差异 ($p<0.05$)。
Noet: Different letters showed significant difference ($p<0.05$).

图 3 不同淹水历时下玉米叶片叶绿素质量分数
Fig.3 Change of chlorophyll mass fraction of maize under different waterlogging days

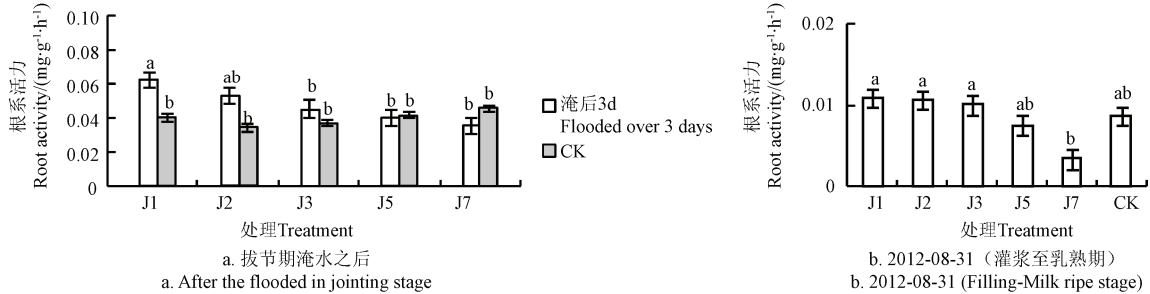
叶绿素含量是反映逆境环境下叶片生理性状的重要指标。J1、J2 和 J3 在淹水结束 3 d，叶绿素含量高于对照 0.29~0.56 mg/g，而 J5 和 J7 在淹水结束 3 d，叶绿素含量低于对照 (图 3a)。玉米灌浆至乳熟期，淹水 5 d 以上处理的叶绿素含量较对

照降低 10.87% (图 3b)。说明冬小麦拔节期受淹低于 3 d，其叶片叶绿素含量无明显变化，受淹 5 d 以上，叶绿素含量降低并无法恢复。

根系活力代表根系吸收水分和营养的能力。J1、J2 和 J3 在淹水结束 3 d，根系活力高于对照

22.57%~54.76%，而 J5 和 J7 在淹水结束 3 d，根系活力降低，降幅分别为 3.3%和 21.90%；其中 J1 淹水结束后根系活力显著提高，其他处理淹水结束后根系活力无明显变化（图 4a）。至玉米灌浆期，淹水 1~3 d 处理的根系活力显著高于对照

15.44%~24.14%，淹水 5 d 以上根系活力低于对照 13.41%~61.28%（图 4b）。因此，玉米拔节期淹水少于 3 d，其根系活力不受影响，当淹水胁迫达到 5 d 以上时，根系活力下降，将影响根系的吸收与代谢能力。



注：图中同一处理中不同字母表示显著性差异 (p<0.05)。
Note: Different letters showed significant difference (p<0.05).

图 4 不同淹水历时下玉米根系活力

Fig.4 Change of root activity of maize under different waterlogging days

2.2 不同淹水历时下籽粒灌浆过程

拔节期淹水使玉米较早地出现黄叶，淹水结束，不同处理的叶片颜色有所不同，J1、J2、J3 和对照的叶片颜色整体比较浓绿；J5 的植株底部叶片偏黄，叶绿素含量降低；J7 的植株出现明显的株矮叶黄。

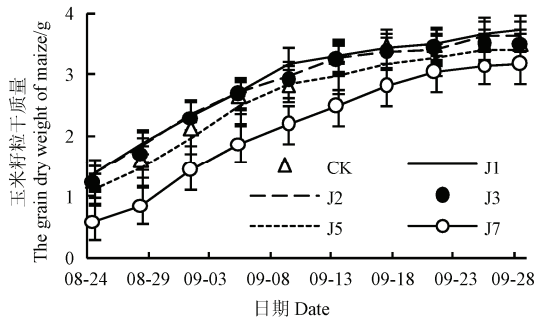


图 5 不同淹水历时下玉米籽粒干质量

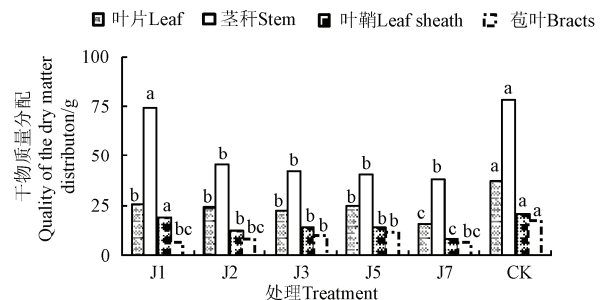
Fig.5 Change of grain dry weight of maize under different waterlogging stress days

玉米拔节期受淹影响其后期灌浆过程，如图 5 所示，玉米灌浆初期，淹水 1~2 d 处理的籽粒干质量大于其他处理，J3 与对照的籽粒质量较为接近。灌浆后期，对照与 J1、J2 和 J3 的玉米籽粒干质量比较接近。在玉米灌浆过程中，J7 一直保持最低的籽粒干质量，而 J5 的籽粒干质量已明显较低，但高于 J7。因此，玉米拔节期淹水影响籽粒灌浆过程，淹水 5 d 以上抑制籽粒干质量。

2.3 不同淹水历时下玉米物质分配、产量及其构成

玉米拔节期淹水后，其营养生长和生殖生长受到抑制导致地上部干物质总量下降。不同受淹历

时，玉米干物质质量分配的比例关系为：茎秆>叶片>叶鞘>苞叶。玉米拔节期受淹时间越长，总干物质质量下降越多，淹水 2 d 以上处理的茎秆、叶片、叶鞘和苞叶都显著降低 (P<0.05,图 6)。玉米拔节期受淹 7 d，已严重影响物质向玉米穗位的转移，穗重显著低于其他处理（图 6，表 1）；玉米拔节期淹水处理的穗粒质量占干物质总质量的比例都高于对照，其中以 J2 和 J3 为最大，分别为 59.81%和 59.22%，对照则为 49.49%；淹水处理的穗粒质量占干物质总质量的比例高于对照 12.47%~20.86%，说明玉米拔节期淹水对其营养生长的影响更为严重。而叶片占干物质总质量的比例以对照最高，淹水 2~7 d 处理的茎秆占干物质总质量的比例显著低于对照，降低 13.85%~29.72%。



注：图中同一指标的不同字母表示显著性差异 (p<0.05)。
Note: Different letters showed significant difference (p<0.05).

图 6 不同淹水历时下成熟期玉米干物质分配

Fig.6 Mature period dry matter distribution of maize under different waterlogging stress days

由表 1 可知，玉米拔节期淹水除对玉米穗行数和穗粗无显著影响外，其他产量构成指标均受到不

同程度的影响。玉米穗长和穗粗随淹水历时总体呈减小的趋势, 但穗粗各处理间无显著差异。拔节期淹水使玉米出现较长的秃尖, J1、J2、J3、J5 的秃尖长度显著大于对照, 其秃尖长为对照的 2 倍左右; J7 的秃尖长度又显著大于对照和其他淹水处理, 其秃尖长为对照的 5 倍。J1、J2、J3 的玉米穗质量和穗粒质量显著大于 J5、J7, 淹水时间越长, 玉米穗粒质量和穗质量下降越多。玉米百粒质量随淹水历时增加受到的影响越大, 拔节期淹水 7 d 的玉米百粒质量显著降低, J1、J2、J3 的玉米百粒质量较对

照提高 0.40%~6.74%, 而 J5、J7 的百粒质量比对照降低了 1.98%~8.97%; 玉米拔节期淹水 5 d 以上, 产量显著降低, J1、J2、J3、J5、J7 的玉米产量分别降低 16.58%、16.65%、26.11%、34.32%和 39.01% (表 1)。由此可见, 玉米拔节期适当淹水, 如淹水 1~3 d, 虽可提高玉米百粒质量, 但由于秃尖长度的增大, 穗长、行粒数的减小, 使得玉米单穗粒质量受到影响, 最终引起减产。玉米拔节期淹水 5 d 以上, 秃尖明显增长, 穗长、穗周长、行粒数、穗粒数、穗质量、百粒质量的减小, 使其产量显著下降。

表 1 拔节期不同淹水历时下玉米产量及其构成
Table 1 Maize yields and its structure under different waterlogging stress days at jointing stage

处理 Treatment	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/ cm	秃尖 Barren tip/ cm	穗行数 Ear rows	行粒数 Line grain number	穗粒质量 Grain mass per ear/g	穗质量 Ear mass/g	百粒质量 Hundred-grain mass/g	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)
J1	16.57a	16.19a	0.33b	13.6a	36.7a	176.22a	188.57a	37.31a	7294.80 b
J2	16.41a	16.24a	0.41b	13.8a	35.9a	164.15a	182.12a	36.55a	7289.25 b
J3	15.76a	15.95a	0.39b	14.8a	35.7a	153.65ab	168.77ab	35.09ab	6461.40 bc
J5	14.67b	15.51a	0.33b	14.2a	32.4b	144.75b	158.75b	34.26b	5743.65 c
J7	13.98b	14.91a	0.86a	14.4a	27.3c	109.69c	122.40c	31.81c	5333.55 c
CK	16.97a	15.99a	0.17c	14.2a	37.9a	168.00a	183.94a	34.95b	8744.85 a

注: 同一列不同字母代表显著性差异 ($p < 0.05$)。

Note: Different letters showed significant difference ($p < 0.05$).

已有研究结果表明, 玉米对涝害的反映以生育前期较为敏感, 植株拔节期淹水后地上部生物质量明显下降, 其营养生长和生殖生长受到较大抑制而导致籽粒产量降低^[13]; 拔节期淹水超过 4 d, 玉米百粒质量和穗粒数明显下降, 经济产量明显受到影响^[14]; 拔节期不同淹水历时使夏玉米减产 9.12%~100%, 拔节期是夏玉米遭受涝害的关键时期, 生产上尽量避免该阶段发生涝渍灾害^[15,19]; 这些结果与本研究结果基本一致。另有研究表明, 玉米拔节期淹水 3 d 使其单株产量降低 16.2%^[20], 夏玉米穗粒数、百粒质量、穗长随淹水历时的增加呈减小趋势, 拔节期淹水 5 d 以上, 夏玉米基本绝收^[21-25], 李香颜^[23]、王成业^[24]和房稳静^[25]等的研究结论与本试验结果存在一定差异, 原因可能由品种的耐淹性、所处环境 (如盆栽)、淹水深度等试验条件有关。

3 结论

1) 玉米拔节期淹水抑制其营养生长, 玉米拔节期淹水 1~7 d, 其株高降低 2.26%~11.36%, 叶面积指数降低 13.04%~34.27%。淹水 5 d 以上, 严重抑制了后期的营养生长补偿能力。

2) 拔节期淹水 5 d 以上, 玉米植株的外部形态表现为株矮叶黄, 叶绿素含量和根系活力下降。玉米拔节期淹水 5 d 以上, 其生殖生长补偿能力较差, 抑制了籽粒干质量。

3) 玉米拔节期淹水后, 其成熟期的地上部干

物质总量明显下降, 受淹时间越长, 干物质质量下降的越多; 玉米穗行数、穗粗与 CK 无显著差异; 玉米秃尖长度为 CK 的 2~5 倍; 淹水历时越长, 玉米穗长、穗粒质量、穗质量和百粒质量的减幅就越大; 淹水 5 d 以上, 玉米产量显著降低, 降幅为 34.32%以上。

本试验对夏玉米拔节期不同淹水历时下的生长特征及产量性状进行了初步研究, 由于淹水的危害程度与土壤、作物品种、气象条件、生长阶段等因素有关, 而本文只涉及 1 a 的研究数据, 得到的初步结果具有一定局限性, 有关结果尚需进一步研究验证。

[参 考 文 献]

- [1] Rusina Yordanova Yordanova, Losanka Petrova Popova. Flooding-induced changes in photosynthesis and oxidative status in maize plants [J]. Acta Physiol Plant, 2007, 29: 535-541.
- [2] Hank W, William A, Timothy C. Conditions leading to high CO₂(>5 kPa) in waterlogged flooded soils and possible effects on root growth and metabolism[J]. Annals of Botany, 2006, 98: 9-32.
- [3] Christiane F, Trevor G, Sergey S. Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of Lucerne (Medicago sativa) to waterlogging and subsequent recovery[J]. Plant and Soil, 2005, 270: 31-45.
- [4] Barry G, Dolen R M, Samira H D. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance

- due to flooding and water table[J]. *Crop Sc*, 2004, 44: 1633—1641.
- [5] Wei H P, Li R Q. Effect of flooding on morphology, structure and ATPase activity in adventitious root apical cells of maize seedlings[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 24(3): 293—297.
- [6] Song F B, Wang X B. Abiotic stress physiological ecology of maize[M]. Beijing: Science Press, 2005: 236—271.
- [9] Yu S W, Tang Z C. Plant physiology and molecular biology [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [10] Zhao K F. Adaptability of plant under waterlogged[J]. *Bulletin of Biology*, 2003, 12(38): 11—14.
- [11] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(10): 2662—2672.
Pan Lan, Xue Li. Plant physiological mechanisms in adapting to waterlogging stress: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(10): 2662—2672. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张玉琼, 张鹤英. 淹水逆境下玉米若干生理生化特性的变化[J]. *安徽农业大学学报*, 1998, 25(4): 378—381.
Zhang Yuqiong, Zhang Heyin. Changes of several physiological and biochemical characteristics in maize leaves under waterlogging stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1998, 25(4): 378—381. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘晓忠, 李建坤, 王志霞, 等. 涝渍逆境下玉米叶片超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性与抗涝性的关系[J]. *华北农学报*, 1995, 10(3): 29—32.
Liu Xiaozhong, Li Jiankun, Wang Zhixia, et al. Relationship between the activities of superoxide dismutase and catalase in corn leaves and waterlogging tolerance[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1995, 10(3): 29—32. (in Chinese with English abstract)
- [14] 徐小万, 雷建军, 李颖, 等. 园艺植物耐湿涝伤害与适应机理研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(6): 130—132.
Xu Xiaowan, Lei Jianjun, Li Ying, et al. Research Advances about Waterlogging-stress Damage and Waterlogging-stress-adapting Mechanism in Horticultural Plants[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 130—132. (in Chinese with English abstract)
- [15] 候春玲, 刘晶. 涝害对玉米不同生育期的影响[J]. *民营科技*, 2013(5): 214—216.
- [16] 冯跃华, 高子乐, 肖俊夫. 涝渍对夏玉米生长发育及产量的影响试验[J]. *人民黄河*, 2013, 35(3): 76—81.
- [17] 刘祖贵, 刘战东, 肖俊夫, 等. 苗期与拔节期淹涝抑制夏玉米生长发育、降低产量[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 45—51.
Liu Zugui, Liu Zhandong, Xiao Junfu, et al. Waterlogging at seedling and jointing stages inhibits growth and development, reduces yield in summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(5): 44—52. (in Chinese with English abstract)
- [18] Jiang D, Fan X, Dai T, et al. Nitrogen fertilizer rate and post-anthesis waterlogging effects on carbohydrate and nitrogen dynamics in wheat[J]. *Plant Soil*, 2008(304): 301—314.
- [19] Setter T L, Waters I, Sharma S K, et al. Review of wheat improvement for waterlogging tolerance in Australia and India: the importance of anaerobiosis and element toxicities associated with different soils[J]. *Annals of Botany (London)*, 2009, 103: 221—235.
- [20] 李香颜, 刘忠阳, 李彤霄. 淹水对夏玉米性状及产量的影响试验研究[J]. *气象学科学*, 2011, 31(1): 79—82.
Li Xiangyan, Liu Zhongyang, Li Tongxiao. An impact test study of the flood disasters on summer corn's characters and yield[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2011, 31(1): 79—82. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘战东, 肖俊夫, 南纪琴, 等. 淹涝对夏玉米形态、产量及其构成因素的影响[J]. *人民黄河*, 2010, 32(12): 157—159.
- [22] 陈国平, 赵仕孝, 刘志文. 玉米的涝害及其防御措施的研究 II、玉米在不同生育期对涝害的反应[J]. *华北农学报*, 1989, 4(1): 16—22.
Chen Guoping, Zhao Shixiao, Liu Zhiwen. Studies on waterlogging of corn and protection measures II. responses of corn to waterlogging in various growing stages[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1989, 4(1): 16—22. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李香颜, 刘忠阳, 李彤霄. 淹水对河南省不同地区夏玉米生长及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(32): 19849—19851.
Li Xiangyan, Liu Zhongyang, Li Tongxiao. Effects of flood disasters on summer maize's characters and yield in different areas of Henan province. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(32): 19849—19851. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王成业. 洪涝灾害对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2010(8): 20—21.
- [25] 房稳静, 武建华, 陈松, 等. 不同生育期积水对夏玉米生长和产量的影响试验[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 616—618.
Fang Wenjing, Wu Jianhua, Chen Song, et al. Experiment for the impact of flood in different development stages on summer maize growth and yields[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(4): 616—618. (in Chinese with English abstract)

Physiological characters and yield formation of corn (*Zea mays* L.) under waterlogging stress in jointing stage

Zhou Xinguo^{1,2}, Han Huiling^{1*}, Li Caixia², Guo Shulong², Guo Dongdong², Cheng Jingping²

(1. Institute of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Science, Xingxiang 453002, China)

Abstract: Maize jointing stage is an important period for reproductive growth and vegetative growth and also in this stage, corn is sensitive to waterlog. In the study area in the jointing stage of corn, frequent waterlog in field often occur causing damage of corn yield. Therefore finding out the upper threshold for number of days that corn can endure waterlog, and understand the corn physiological reaction after flooding can help to develop management tools to improve corn production. The bottomless pit measurement was set at different waterlogging days (1, 2, 3, 5, and 7 d) to determine the corn response to waterlogging duration and the effect of waterlogging duration on corn growth, grain fill, dry mater distribution and yield characteristics. At the vegetative growth stage, the results showed that the average plant height of corn with 1, 2, 3, 5, and 7 days of waterlog was reduced by 2.26%, 2.26%, 2.45%, 11.36% and 10.17%, respectively, and the LAI (leaf area index) was decreased respectively by 23.79%, 18.93%, 13.04%, 32.74% and 34.27% as compared with the CK (control treatment). With the waterlogging duration more than 5 days at the jointing stage, the plants became dwarf and the leaves turned yellow. For plant physiological response, three days after each flooding duration test showed that chlorophyll content of leaves with the flooding duration of 1, 2, and 3 days was higher ($p < 0.05$) than CK, and root activity increased. But the chlorophyll content of leaves and root activities of flooding duration of five and seven days decreased as compared to the CK. The result also showed that with the flooding duration more than 5 days, chlorophyll content of leaves from corn filling stage to milk-ripe stage was 10.87% lower ($p < 0.05$) than that of the CK. Therefore once the waterlogging duration was more than five days at the jointing stage, chlorophyll content of leaves would stay lower and not be recovered. For the reproductive growth stage, flooding duration at the corn jointing stage affected the grain quality of post filling. The result indicated that compared with the CK, the grain yield of waterlogging duration with 1, 2, and 3 days was rather similar, but with 5 days, it was lower ($p < 0.05$) and it was the lowest with flood duration of 7 days. The ear rows and ear width of corn decreased with the increase of the number of days of flooding, but it was not significantly different as compared to the CK. The corn ear tip-barren had significant difference ($p < 0.05$) than the CK. The corn ear tip-barren from waterlogging duration of 1, 2, 3, and 5 days was about two times higher than the CK, the flooding duration of the 7 days was five times higher than the CK. The ear length, ear weight, ear grain weight and hundred-grain weight of corn decreased as the waterlogging day increased. The yield of corn with 1, 2, 3, 5, and 7 waterlogging days were reduced by 16.58%, 16.65%, 26.11%, 34.32% and 39.01%, respectively. Therefore waterlogging duration over 5 days not only affected the normal growth of corn, but also reduced the yield significantly. The research provided information for waterlogging monitoring, fast evaluation of damage and waterlogged field drainage standard determination.

Key words: chlorophyll; drainage; crops; waterlogging stress; lasting days; growth; grain fill; yield