

宽行垄作增强苗期淹水夏玉米光合和抗倒性提高产量

王成雨¹, 张丽琼¹, 宋 贺¹, 李 静¹, 程备久^{2*}

(1. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学生命科学院, 合肥 230036)

摘 要: 为探明苗期淹水夏玉米对不同种植方式的响应规律, 在大田条件下, 以先玉 335 为材料, 设置传统平作和宽行垄作两种种植方式, 分别进行正常水分处理(模拟不淹水年型)和淹水处理(模拟淹水年型), 分析了传统平作和宽行垄作两种种植方式对苗期淹水夏玉米光合特性和抗倒性能以及产量的影响。结果表明: 淹水年型下, 宽行垄作功能叶 SPAD 值和光合速率恢复至不淹水年型水平与传统平作相比提前了 10 d, 宽行垄作与传统平作相比在淹水年型下可以快速改善夏玉米功能叶光合能力。淹水年型下, 宽行垄作叶面积在淹水后 15 d 即可恢复至不淹水年型水平, 而传统平作至淹水后 30 d 仍不能恢复至不淹水年型水平, 宽行垄作与传统平作相比在淹水年型下提供了更大的绿色光合面积。淹水年型下, 传统平作第 3 节间茎粗、刺穿强度和弯折强度等抗倒指标显著变差, 两年平均值比不淹水年型分别降低了 20.1%、16.1% 和 20.0%; 宽行垄作第 3 节间抗倒指标在两种水分年型下差异不显著; 同一水分年型下, 两种种植方式抗倒性能差异不显著。淹水年型下, 宽行垄作空秆率和千粒质量显著低于传统平作, 两年平均值分别降低了 21.5% 和 5.7%。传统平作淹水年型下穗粒数显著低于不淹水年型 ($P<0.05$), 两年平均值降低了 11.3%; 宽行垄作在两种水分年型下穗粒数差异不显著, 宽行垄作较传统平作可以获得相对稳定的穗粒数。与不淹水年型相比, 淹水年型下传统平作和宽行垄作均显著减产 ($P<0.05$), 两年减产平均值分别为 1 349.6 和 547.3 kg/hm², 但无论淹水与否, 宽行垄作产量均不低于传统平作; 淹水年型下, 传统平作减产率显著高于宽行垄作 ($P<0.05$), 两年分别高 14.1% 和 6.8%, 宽行垄作稳产性更好。研究结果可以为涝害易发生地区夏玉米高产稳产栽培提供理论依据和技术支持。

关键词: 光合; 作物; 水分; 夏玉米; 宽行垄作; 苗期淹水; 抗倒性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.019

中图分类号: S513

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0129-07

王成雨, 张丽琼, 宋 贺, 李 静, 程备久. 宽行垄作增强苗期淹水夏玉米光合和抗倒性提高产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 129—135. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.019 <http://www.tcsae.org>

Wang Chengyu, Zhang Liqiong, Song He, Li Jing, Cheng Beijiu. Broad-row ridge culture improving photosynthetic characteristics and lodging resistance, and increasing yield of summer maize with waterlogging at seedlings stage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 129—135. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.019 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

涝害是中国常见重大农业自然灾害之一, 不仅使作物产量降低, 还可使作物品质变劣, 经常给农业生产带来巨大损失^[1-3]。

玉米根系呼吸作用强且需氧量大, 易受涝害影响, 不同生育时期淹水均可导致减产, 但以苗期减产幅度最大^[4]。玉米减产的原因在于缺氧使玉米正常生理功能受到破坏, 无氧呼吸增强, 乙醇、活性氧等有害物质或离子增多; 同时, 土壤中硫化氢、硫化亚铁等有害物质大量积累, 根系吸收能力下降; 进而导致玉米叶片光合能力

下降, 叶绿素分解加快, 光合系统遭到破坏, 玉米正常生长和发育受到抑制; 淹水还会导致玉米抗倒性能减弱, 倒伏风险增加; 最终导致玉米减产^[5-9]。

黄淮海南部玉米区近年来夏玉米种植面积不断增大, 但由于该区夏玉米苗期正值梅雨季节, 涝害经常发生而给该区玉米安全生产带来很大威胁^[10-11]。在该区种植的玉米品种中, 先玉 335 等品种具有产量高和后期脱水率快等优点而种植面积较大, 但这类品种在淹水条件下往往因减产幅度大给易淹水地区玉米生产造成较大的产量损失^[11]。目前, 玉米抗涝技术的研究主要集中在品种选择和生化制剂应用方面, 关于种植方式对淹水夏玉米受害机理和恢复机制的研究相对较少^[12], 因而, 通过改良栽培措施, 探索有效的玉米抗涝栽培途径, 减少淹水造成的产量损失, 对于保障黄淮海南部夏玉米高产稳产具有重要意义。

在种植方式的利用方面, 垄作有利于表层土壤微生物的繁殖和生长, 提高土壤活性; 增大土壤和雨水的接触面积, 减少雨水径流, 提高下渗, 增强土壤保水能力, 提高水分利用效率; 显著提高土壤温度, 增加土壤大团聚体含量, 在中国旱地和寒地作物栽培中应用广泛^[13-19]。但是, 关于垄作在玉米抗涝方面的研究相对较少且对垄作的耐

收稿日期: 2015-05-21 修订日期: 2015-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(31371566), 国家科技支撑计划(2012BAD20B02), 公益性行业专项(农业)科研专项(201203033), 安徽高等教育振兴计划项目“作物学科高水平教师团队建设”。

作者简介: 王成雨, 男, 山东梁山人, 博士, 讲师, 主要从事玉米抗逆高产稳产生理研究。合肥 安徽农业大学农学院, 230036。

Email: Wangcy523@163.com

*通信作者: 程备久, 男, 安徽桐城人, 教授, 主要从事玉米抗逆育种和生理研究。合肥 安徽农业大学生命科学院, 230036。

Email: Cbj@ahau.edu.cn

涝机理缺乏研究^[20-21]。因而,本研究通过研究宽行垄作种植方式对苗期淹水夏玉米光合和抗倒性能的影响,为涝害易发生地区夏玉米高产稳产栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2013 年和 2014 年在安徽省阜南县农业科学研究所进行,耕作制度为一年两熟,2013 年和 2014 年玉米生长季降水量分别为 607 和 591 mm,土壤类型为砂姜黑土,0~20 cm 土层土壤有机质质量分数为 16.8 g/kg,全氮为 1.53 g/kg,碱解氮为 83.2 mg/kg,速效磷为 56.5 mg/kg,速效钾为 78.7 mg/kg, pH 值为 6.98。

试验以涝害敏感型品种先玉 335 为材料,设置传统平作和宽行垄作两种种植方式,分别进行正常水分处理(模拟不淹水年型)和淹水处理(模拟淹水年型),共 4 个处理,分别为传统平作不淹水处理(TW₀)、传统平作淹水处理(TW₁)、宽行垄作不淹水处理(RW₀)和宽行垄作淹水处理(RW₁),完全随机区组设计,重复 3 次。淹水时期为 4 叶期,淹水深度高出畦面 1 cm,考虑到近十年来该地玉米苗期地面最长持续水面淹没时间为 68 h,依据逆境试验条件从严的原则,将试验连续淹水时间设定为 72 h。小区长 20.0 m,宽 5.4 m,各小区间间隔 3.0 m,起 0.4 m 高田埂,并种植保护行,以防止各处理水分差异造成影响。传统平作不淹水处理和传统平作淹水处理等行距种植,行距为 0.6 m,株距为 0.277 m;宽行垄作不淹水处理和宽行垄作淹水处理亦等行距种植,考虑到美国玉米生产中 0.9 m 行距仍有应用并能获得可观产量同时考虑增强玉米的抗倒性因而将这两个处理的行距设为 0.9 m,株距为 0.185 m^[22-23]。玉米种植于垄上,4 个处理种植密度均约为 60 000 株/hm²。

播种日期为 2013 年 6 月 10 日和 2014 年 6 月 10 日,淹水具体日期分别为 2013 年 6 月 19 日和 2014 年 6 月 19 日,苗期施氮肥(纯氮)8 kg/hm²,大喇叭口施氮肥(纯氮)16 kg/hm²,其他管理措施同当地高产玉米田。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 叶绿素含量的测定

于 4 叶期晴朗无风的上午 9:00—11:00,用日本 KONICA MINOLTA 公司产 SPAD-502PLUS 型叶绿素计测定夏玉米功能叶叶绿素含量(SPAD 值),每处理测定 10 片叶片,取平均值,以后每 5 天测定一次,共测定 7 次。功能叶在雌穗未露出叶鞘时指植株上部第 1 片完全展开叶,雌穗露出叶鞘后指穗位叶。

1.2.2 光合速率的测定

自 4 叶期,每次测定功能叶 SPAD 值后,采用美国 LI-COR 公司产 LI-6400 测定功能叶光合速率。

1.2.3 单株叶面积的测定

自 4 叶期,每处理取 5 株,用刻度为 0.001 m 钢卷尺量取各个单株每片叶片的长度和宽度,单株叶面积为该株所有叶片叶面积之和,取样后立即进行淹水处理,以

后每 5 天取样一次,共测定 7 次。

$$\text{叶面积} = \text{长度} \times \text{宽度} \times 0.833$$

1.2.4 抗倒性能的测定

于灌浆中期,每处理取 10 株玉米基部节间进行抗倒性能测定,并对数据求平均值。

基部第 3 节间粗度:取基部第 3 节间,用游标卡尺测定其粗度。

基部第 3 节间刺穿强度:采用浙江托普仪器有限公司产 YYD-1 型茎秆强度测定仪,将横断面积为 0.01 cm²的测定头从第 3 节间中部垂直于茎秆方向匀速缓慢插入,读取穿透最大值。

基部第 3 节间弯折强度:将茎秆平放置于浙江托普仪器有限公司产 YYD-1 型茎秆强度测定仪的凹槽内,迅速压下使茎秆弯折,记录使茎秆弯折的数值。

1.2.5 考种

玉米收获期,每小区收获中间 3 行共 30 株玉米植株的果穗,风干后考种,考察穗粒数、千粒质量和 30 株玉米果穗籽粒总质量,同时调查整个小区空秆率(%)。

$$\text{产量} = \text{取样果穗籽粒总质量} / \text{取样株数} \times \text{单位面积株数} \times (1 - \text{空秆率})$$

1.3 数据处理

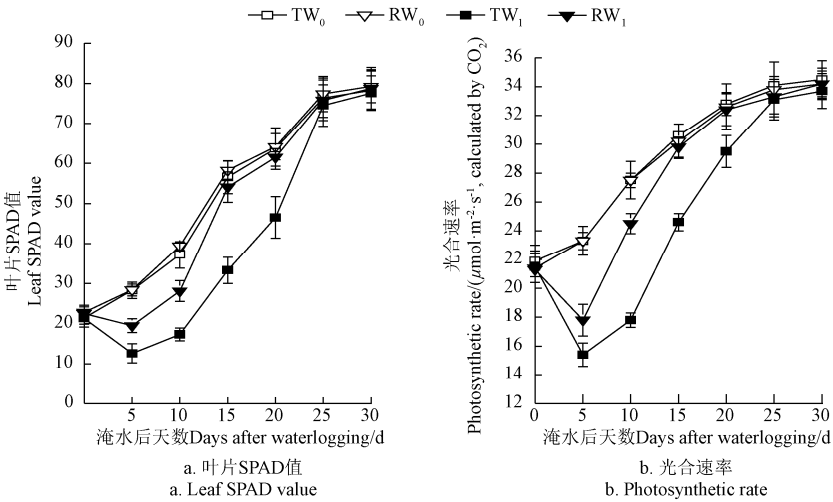
采用 origin8.5 进行作图,采用 SPSS17.0 软件进行数据统计和分析。两年数据规律基本一致。鉴于文章篇幅,本文采用 2013 年和 2014 年数据的平均值进行作图,表格给出了 2013 和 2014 两个玉米生长季的数据。

2 结果与分析

2.1 叶绿素和光合速率

由图 1 可知,淹水前各处理功能叶 SPAD 值(图 1a)和光合速率(图 1b)差异不显著;传统平作不淹水处理(TW₀)和宽行垄作不淹水处理(RW₀)在淹水后 30 d 内功能叶 SPAD 值和光合速率最高,且差异不显著,说明不淹水年型下种植方式对功能叶 SPAD 值和光合速率影响不大;淹水后第 5 至 20 天,传统平作淹水处理(TW₁)功能叶 SPAD 值和光合速率显著低于 TW₀和 RW₀,25 d 后与 TW₀和 RW₀无显著差异;淹水后第 5 到 10 天,宽行垄作淹水处理(RW₁)功能叶 SPAD 值和光合速率显著低于 TW₀和 RW₀,15 d 后与 TW₀和 RW₀差异不显著,且 RW₁功能叶 SPAD 值和光合速率在淹水后第 5 至 20 天显著高于 TW₁,RW₁功能叶 SPAD 值和光合速率恢复至正常水平的时间比 TW₁早 10 d,说明淹水年型下宽行垄作与传统平作相比可显著缩短功能叶 SPAD 值和光合速率恢复至不淹水年型水平的时间,为产生更多的光合产物奠定了生理基础。相关分析也表明,在本试验条件下,功能叶 SPAD 值和光合速率的相关系数为 0.913,达极显著水平($P < 0.01$),进一步证明淹水年型下功能叶光合速率的改善是通过增加其叶绿素含量来实现的。前人研究表明,玉米苗期持续淹水 144 h 解除后,玉米叶绿素含量和光合速率生理指标至玉米生育后期(灌浆期)并不能恢复至正常水平^[24-28],而本研究表明传统平作淹水处理功能叶 SPAD 值

和光合速率在淹水后 25 d 与 TW₀ 和 RW₀ 差异不显著，宽行垄作淹水处理功能叶叶绿素含量和光合速率在淹水后 15 d 即与 TW₀ 和 RW₀ 差异不显著，这与前人研究并不一致，这可能是与本试验的淹水时间相对较短有关。



注：TW₀、RW₀、TW₁ 和 RW₁ 分别代表传统平作不淹水处理、宽行垄作不淹水处理、传统平作淹水处理和宽行垄作淹水处理，下同。
Note: TW₀, RW₀, TW₁ and RW₁ are treatments of traditional culture without waterlogging (TW₀), broad-row ridge culture without waterlogging (RW₀), traditional culture with waterlogging at seedlings stage (TW₁) and broad-row ridge culture with waterlogging (RW₁), the same below.

图 1 宽行垄作对苗期淹水夏玉米功能叶 SPAD 值和光合速率的影响
Fig.1 Effects of broad-row ridge culture planting pattern on leaf SPAD value and photosynthetic rate of functional leaf of summer maize being waterlogged at seedlings stage

2.2 叶面积

由图 2 可知，淹水前各处理单株叶面积差异不显著；传统平作不淹水处理（TW₀）和宽行垄作不淹水处理（RW₀）在淹水后 30 d 内单株叶面积最高，且差异不显著，说明在不淹水年型下种植方式对单株叶面积影响不大；淹水后 5~30 d，传统平作淹水处理（TW₁）单株叶面积显著低于 TW₀；淹水后 5~10 d，宽行垄作淹水处理（RW₁）单株叶面积显著低于 TW₀ 和 RW₀，15 d 后与不淹水年型无显著差异，且从淹水后 5 d 开始显著高于淹水平作，说明淹水年型下淹水后 5 d 宽行垄作叶面积增加速度就超过了传统平作，宽行垄作与传统平作相比在淹水年型下更加有利于叶面积恢复至不淹水年型水平，从而保证了更大的光合叶面积。

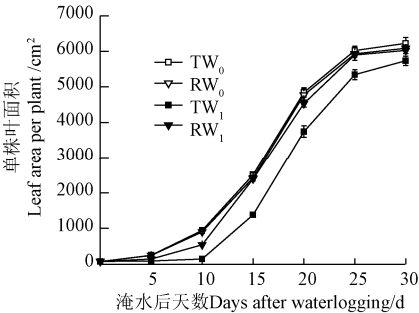


图 2 宽行垄作对苗期淹水夏玉米单株叶面积的影响
Fig.2 Effect of broad-row ridge culture planting pattern on leaf area per plant summer maize being waterlogged at seedlings stage

2.3 抗倒性能

倒伏是制约玉米高产稳产的另一重要因素，多发生在基部第 3 节间，故研究玉米第 3 节间抗倒性能具有重

要意义^[29]。由表 1 可知，在 2013 和 2014 两个玉米生长季，茎粗、刺穿强度和弯折强度等抗倒指标变化规律相同，均表现为传统平作不淹水处理（TW₀）和宽行垄作不淹水处理（RW₀）各项抗倒指标数值最高，且差异不显著，说明不淹水年型下种植方式对玉米第 3 节间抗倒性能影响较小；宽行垄作淹水处理（RW₁）抗倒指标数值次之，与其他 3 个处理差异不显著，说明宽行垄作无论淹水与否，其抗倒性能并未显著降低；传统平作第 3 节间节间茎粗、刺穿强度和弯折强度淹水年型下显著劣于不淹水

表 1 宽行垄作对苗期淹水夏玉米第 3 节间抗倒性能的影响
Table 1 Effect of broad-row ridge culture planting pattern on lodging resistance of third internode of summer maize being waterlogged at seedlings stage

年份 Year	处理 Treatment	节间茎粗 Stem diameter/ cm	刺穿强度 Stalk rind penetration strength/ (N·mm ⁻²)	弯折强度 Bending Property/N
2013	TW ₀	2.27a	53.61a	440.67a
	RW ₀	2.22a	51.57a	421.59a
	TW ₁	1.84b	45.75b	350.52b
	RW ₁	2.06ab	48.30ab	393.93ab
2014	TW ₀	2.19a	52.98a	430.35a
	RW ₀	2.21a	52.43a	410.60a
	TW ₁	1.70b	43.66b	342.83b
	RW ₁	1.97ab	48.92ab	383.15ab

注：TW₀、RW₀、TW₁ 和 RW₁ 分别代表传统平作不淹水处理、宽行垄作不淹水处理、传统平作淹水处理和宽行垄作淹水处理；同一列数据后相同字母表示处理间在 0.05 水平上差异不显著，下同。
Note: TW₀, RW₀, TW₁ and RW₁ are treatments of traditional culture without waterlogging (TW₀), broad-row ridge culture without waterlogging (RW₀), traditional culture with waterlogging at seedlings stage (TW₁) and broad-row ridge culture with waterlogging (RW₁), and values followed by the same letter within a column are not significantly different at P<0.05 among treatments, the same below.

年型, 两年平均值分别降低了 20.1%、16.1%和 20.0%, 宽行垄作第 3 节间抗倒指标在两种水分年型下差异不显著; 同一水分年型下, 两种种植方式抗倒性能差异不显著, 说明淹水显著降低了传统平作的抗倒性能, 这与任佰朝等的研究结论相同^[5]。

综上所述, 就种植方式而言, 宽行垄作的抗倒性能与传统平作相比更加稳定。玉米传统平作行距为 0.6 m, 起垄后玉米根系伸展空间受到限制, 不利于与抗倒能力密切相关的玉米浅层根系和气生根发育, 倒伏风险增加, 而本研究宽行垄作并未显著降低玉米抗倒性能的原因可能在于宽行给玉米根系伸展提供了相对较大的生长空间, 同时垄作有利于清沟沥水, 加大水分蒸发, 有利于根系伸展^[30]。

2.4 产量

由表 2 可知, 在 2013 和 2014 两个玉米生长季, 各处理株数差异不显著。空秆率和千粒质量以传统平作不淹水处理 (TW₀) 和宽行垄作不淹水处理 (RW₀) 最低, 且差异不显著, 说明不淹水年型下种植方式对空秆率和千粒质量影响不大; 宽行垄作淹水处理 (RW₁) 和传统平作淹水处理 (TW₁) 均显著高于 TW₀ 和 RW₀, 说明淹水显著提高了空秆率和千粒质量, TW₁ 和 RW₁ 玉米千粒质量增加可能是与淹水后粒数下降的幅度较大, 而散粉后 (黄淮海南部玉米区玉米散粉期通常在播种后 45 d, 即本研究的最后一次生理指标测定期—淹水后 30 d) 叶面积下降幅度较小, 光合能力并未减弱, 源库比增加有关;

淹水年型下 RW₁ 空秆率和千粒质量显著低于 TW₁, 两年平均值分别降低了 21.5%和 5.7%。穗粒数以 TW₀ 最高; RW₀ 和 RW₁ 次之, 与 TW₀ 差异不显著; TW₁ 最低, 显著低于 TW₀, 但与 RW₀ 和 RW₁ 差异不显著, 说明种植方式在同一水分年型下对穗粒数的影响不显著, 传统平作淹水年型下穗粒数显著低于不淹水年型, 两年平均值降低了 11.3%; 宽行垄作在两种水分年型下穗粒数差异不显著, 宽行垄作可以获得相对稳定的穗粒数。在两个玉米生长季 TW₀ 与 RW₀ 产量最高且差异不显著, 说明不淹水年型下种植方式对产量影响不大; 在 2013 年 RW₁ 产量与 TW₀ 无显著差异, 但显著低于 RW₀, 而在 2014 年 RW₁ 产量显著低于 TW₀ 和 RW₀; 两个玉米生长季均以 TW₁ 产量最低, 显著低于其他 3 个处理, 说明淹水年型与不淹水年型相比, 传统平作和宽行垄作产量均显著减产, 两年减产平均值分别为 1349.6 和 547.3 kg/hm², 但无论淹水与否宽行垄作均不低于传统平作, 即宽行垄作稳产性更好。两个玉米生长季减产率均以 TW₁ 最高, 显著高于 RW₁, 两年分别高 14.1%和 6.8%, 而 RW₁ 又显著高于 TW₀ 和 RW₀, TW₀ 和 RW₀ 差异不显著, 说明淹水年型下宽行垄作与传统平作相比减产幅度更低, 同样说明宽行垄作稳产性更好, 这种稳产的原因可能是宽行垄作与传统平作相比在淹水年型下具有相对高的光合速率和更大的光合叶面积 (由图 1 和图 2 可知), 因而在光合时间相同的条件下能够产生更多的光合产物, 进而实现了高产稳产。

表 2 宽行垄作对苗期淹水夏玉米产量及其构成因素的影响

Table 2 Effect of broad-row ridge culture planting patterns on grain yield and yield components of summer maize being waterlogged at seedlings stage

年份 Year	处理 Treatment	株数 Harvest plant/(plant·hm ⁻²)	空秆率 Barrenness/%	穗粒数 Grains per ear	千粒质量 1000-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	减产率 Rate of descent/%
2013	TW ₀	60 577a	7.2c	541.6a	320.1c	8 283.3ab	2.7c
	RW ₀	60 281a	8.1c	521.7ab	314.7c	8 517.6a	0c
	TW ₁	60 163a	16.8a	489.1b	345.8a	6 624.1c	22.2a
	RW ₁	60 526a	11.1b	519.8ab	330.5b	7 826.8b	8.1b
2014	TW ₀	60 331a	6.4c	527.5a	311.6c	7 889.6a	0c
	RW ₀	60 195a	7.1c	514.4ab	315.8c	7 796.6a	1.1c
	TW ₁	60 126a	17.5a	459.3b	353.7a	6 849.6c	13.1a
	RW ₁	60 452a	12.8b	501.2ab	329.2b	7 392.9b	6.3b

注: 2013 年减产率(%)=(RW₀产量-处理产量)/RW₀×100%; 2014 年减产率(%)=(TW₀产量-处理产量)/TW₀×100%。

Note: Rate of descent in 2013 =(yield of RW₀-yield of treatment)/yield of RW₀×100%; Rate of descent in 2014 =(yield of TW₀-yield of treatment)/yield of TW₀×100%.

尽管不淹水年型宽行垄作 (RW₀) 下产量不低于传统平作 (TW₀), 且淹水年型 (RW₁) 下显著高于平作处理 (TW₁), 但两年试验结果表明, RW₁ 比两年的最高产量分别降低了 8.1%和 6.3%, 显著低于每年最高产量, 因而, 垄作种植方式结合其他抗涝栽培技术, 如选用抗涝品种、改善施肥方式、喷施抗涝生化制剂或配合清沟沥水等工程抗涝措施, 降低涝害造成的产量损失并保障易受涝夏玉米安全生产值得进一步研究^[11-12, 31-34]。

3 结论

淹水年型下, 宽行垄作功能叶叶绿素含量和光合速率恢复至不淹水年型水平与传统平作相比提前了 10 d,

宽行垄作与传统平作相比在淹水年型下可以快速改善夏玉米功能叶光合能力。

淹水年型下, 宽行垄作叶面积在淹水后 15 d 即可恢复至不淹水年型水平, 而传统平作至淹水后 30 d 仍不能恢复至不淹水年型水平, 宽行垄作与传统平作相比在淹水年型下提供了更大的绿色光合面积。

淹水年型下, 传统平作第 3 节间茎粗、刺穿强度和弯折强度等抗倒指标显著变劣, 两年平均值比不淹水年型分别降低了 20.1%、16.1%和 20.0%; 宽行垄作第 3 节间抗倒指标在两种水分年型下差异不显著; 同一水分年型下, 两种种植方式抗倒性能差异不显著。

淹水年型下, 宽行垄作空秆率和千粒质量低于传统

平作, 两年平均值分别降低了 30.4% 和 5.7%。传统平作淹水年型下穗粒数显著低于不淹水年型, 两年平均值降低了 11.3%; 宽行垄作在两种水分年型下穗粒数差异不显著, 宽行垄作可以获得相对稳定的穗粒数。与不淹水年型相比, 淹水年型下传统平作和宽行垄作均显著减产, 两年减产平均值分别为 1 349.6 和 547.3 kg/hm², 但无论淹水与否宽行垄作产量均不低于传统平作; 淹水年型下, 2013 年、2014 年传统平作减产率比宽行垄作高 14.1%、6.8%, 宽行垄作稳产性更好。

[参 考 文 献]

- [1] Xu Mingyue, Ma Haiqing, Zeng Liu, 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.
- [2] Zhang Yanjun, Song Xuezheng, Yang Guozheng, et al. Physiological and molecular adjustment of cotton to waterlogging at peak-flowering in relation to growth and yield[J]. *Field Crops Research*, 2015, 179: 164—172.
- [3] Lu Dalei, Cai Xuemei, Shi Yaxing, et al. Effects of waterlogging after pollination on the physicochemical properties of starch from waxy maize[J]. *Food Chemistry*, 2015, 179(4): 232—238.
- [4] 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 127—136.
Yu Weidong, Feng Liping, Sheng Shaoxue, et al. Effect of waterlogging at jointing and tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(13): 127—136. (in Chinese with English abstract)
- [5] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对高产夏玉米抗倒伏性能的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12): 2440—2448.
Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effects of waterlogging on stem lodging resistance of summer maize under field conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2440—2448. (in Chinese with English abstract)
- [6] Meyer W S, Barrs H D, Mosier A R, et al. Response of maize to three short-term periods of waterlogging at high and low nitrogen levels on undisturbed and repacked soil[J]. *IrrigSci*, 1987, 8(4): 257—272.
- [7] Smethurst C, Garnett T, Shabala S. Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of lucerne (*Medicago sativa*) to waterlogging and subsequent recovery[J]. *Plant Soil*, 2005, 270(1): 31—45.
- [8] Yordanova R, Popova L. Flooding-induced changes in photosynthesis and oxidative status in maize plants[J]. *Acta Physiol Plant*, 2007, 29(6): 535—541.
- [9] Tang Bin, Xu Shangzhong, Zou Xiling, et al. Changes of antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of waterlogging-tolerant and waterlogging-sensitive maize genotypes at seedling stage[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(5): 651—661.
- [10] 毛文书, 王谦谦, 李国平, 等. 近 50 a 江淮梅雨的区域特征[J]. *气象科学*, 2008, 28(1): 68—73.
Mao Wenshu, Wang Qianqian, Li Guoping, et al. Regional features of the precipitation over the Changjiang-Huaihe region during the Meiyu period[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2008, 28(1): 68—73. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王成雨, 宋贺, 胡玲惠, 等. 玉米品种耐淹形态指标筛选及其耐淹光合生理特性研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(4): 533—539.
Wang Chengyu, Song He, Hu Linghui, et al. Screening for cultivars with water-logging resistance through analyzing morphological indexes and photosynthetic characteristics in maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(4): 533—539. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zaidi P H, Rafique S, Singh N N. Response of maize (*Zea mays* L.) genotypes to excess soil moisture stress: morpho-physiological effects and basis of tolerance[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(3): 383—399.
- [13] 孙冰洁, 贾淑霞, 张晓平, 等. 耕作方式对黑土表层土壤微生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 101—107.
Sun Bingjie, Jia Shuxia, Zhang Xiaoping, et al. Impact of tillage practices on microbial biomass carbon in top layer of black soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 101—107. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王龙昌, 邹聪明, 张云兰, 等. 西南“旱三熟”地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效益的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(10): 1880—1890.
Wang Longchang, Zou Congming, Zhang Yunlan, et al. Influences of conservation tillage practices on farmland soil ecological factors and productive benefits in dry-land region with triple cropping system in southwest China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(10): 1880—1890. (in Chinese with English abstract)
- [15] 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 垄作免耕技术对土壤水分和玉米产量的影响 (英文) [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 2): 146—150.
Wang Qingjie, Li Hongwen, He Jin, et al. Effect of ridge culture and no-tillage on soil moisture and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(Supp.2): 146—150. (in English with Chinese abstract)
- [16] 熊又升, 徐祥玉, 张志毅, 等. 垄作免耕影响冷浸田水稻产量及土壤温度和团聚体分布[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 157—164.
Xiong Yousheng, Xu Xiangyu, Zhang Zhiyi, et al. Effect of ridge culture and no-tillage on soil moisture and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(15): 157—164. (in Chinese with English abstract)
- [17] Chen Changqing, Lei Chengxia, Deng Aixin, et al. Will higher minimum temperatures increase corn production in Northeast China? An analysis of historical data over 1965—2008[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1580—1588.

- [18] Song Zhenwei, Guo Jinrui, Zhang Zhenping, et al. Impacts of planting systems on soil moisture, soil temperature and corn yield in rainfed area of Northeast China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 66—74.
- [19] Chen Y, Liu S, Li H, et al. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011(115/116): 56—61.
- [20] Singh R, Ghildyal B P. Soil submergence effects on nutrient uptake, growth, and yield of five corn cultivars[J]. *Agronomy Journal*, 1980, 72(5): 737—741.
- [21] Hatfield J L, Allmaras R R, Rehm G W, et al. Ridge tillage for corn and soybean production: environmental quality impacts[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48(3): 145—154.
- [22] 刘伟, 张吉旺, 吕鹏, 等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(7): 1301—1307.
Liu Wei, Zhang Jiwang, Lv Peng, et al. Effect of plant density on grain yield dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai 661[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1301—1307. (in Chinese with English abstract)
- [23] 罗锡文. 加强农机农艺融合加速农机化发展[J]. *农机科技推广*, 2011(12): 4—11.
Luo Xiwen. Accelerating developing the progress of mechanization of farming by inoculating the mechanization of farming and the agronomy[J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2011(12): 4—11. (in Chinese with English abstract)
- [24] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 淹水胁迫对夏玉米籽粒灌浆特性和品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(21): 4435—4445.
Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effect of waterlogging on grain filling and quality of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(21): 4435—4445. (in Chinese with English abstract)
- [25] 梁哲军, 陶洪斌, 王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3977—3986.
Liang Zhejun, Tao Hongbin, Wang Pu. Recovery effects of morphology and photosynthetic characteristics of maize(Zey mays L.) seedlings after water-logging[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3977—3986. (in Chinese with English abstract)
- [26] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1022—1028.
Ren Baizhao, Zhang Jiwang, Li Xia, et al. Effect of waterlogging on leaf senescence characteristics of summer maize in the field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1022—1028. (in Chinese with English abstract)
- [27] 任佰朝, 朱玉玲, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(2): 329—338.
Ren Baizhao, Zhu Yuling, Li Xia, et al. Effects of waterlogging on photosynthetic characteristics of summer maize under field conditions[J]. *Acta Agron Sinica*, 2015, 41(2): 329—338. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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)
- [29] 李霞, 张吉旺, 任佰朝, 等. 小麦玉米周年生产中耕作对夏玉米产量及抗倒伏能力的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(6): 1093—1101.
Li Xia, Zhang Jiwang, Ren Baizhao, et al. Yield and lodging resistance of summer maize under different winter wheat-summer maize tillage systems[J]. *Acta Agron Sinica*, 2014, 40(6): 1093—1101. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李旭, 闫洪奎, 曹敏建, 等. 不同耕作方式对土壤水分及玉米生长发育的影响[J]. *玉米科学*, 2009, 17(6): 76—78, 81.
Li Xu, Yan Hongkui, Cao Minjian, et al. Effects of different tillage managements on soil moisture and growth and development of maize[J]. *Journal of Maize Science*, 2009, 17(6): 76—78, 81. (in Chinese with English abstract)
- [31] 漆栋良, 吴雪, 胡田田. 施氮方式对玉米根系生长、产量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2804—2813.
Qi Dongliang, Wu Xue, Hu Tiantian. Effects of nitrogen supply methods on root growth, yield and nitrogen use of maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(14): 2804—2813. (in Chinese with English abstract)
- [32] 僧珊珊, 王群, 张永恩, 等. 外源亚精胺对淹水胁迫玉米的生理调控效应[J]. *作物学报*, 2012, 38(6): 1042—1050.
Seng Shanshan, Wang Qun, Zhang Yongen, et al. Effects of exogenous spermidine on physiological regulatory of maize after waterlogging Stress[J]. *Acta Agron Sinica*, 2012, 38(6): 1042—1050. (in Chinese with English abstract)
- [33] 陈晓璐, 李耕, 刘鹏, 等. 6-苄氨基嘌呤(6-BA)对不同氮素水平下玉米叶片衰老过程中光系统 II 性能的调控效应[J]. *作物学报*, 2013, 39(6): 1111—1118.
Chen Xiaolu, Li Geng, Liu Peng, et al. Effects of exogenous hormone 6-benzyl adenine (6-BA) on photosystem II performance of maize during process of leaf senescence under different nitrogen fertilization levels[J]. *Acta Agron Sinica*, 2013, 39(6): 1111—1118. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李法虎, Keren R, Benhur M. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间变异性分析[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 64—69.
Li Fahu, Keren R, Benhur M. Analysis of spatial variability of soil characteristics and crop yield under subsurface drainage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(6): 64—69. (in Chinese with English abstract)

Broad-row ridge culture improving photosynthetic characteristics and lodging resistance, and increasing yield of summer maize with waterlogging at seedlings stage

Wang Chengyu¹, Zhang Liqiong¹, Song He¹, Li Jing¹, Cheng Beijiu^{2*}

(1. School of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. School of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To better understand the effects of broad-row ridge culture pattern on photosynthetic characteristics, lodging resistance and yield for summer maize waterlogged at seedlings stage, an experiment was conducted in the Institute of Agriculture Science in Funan County in 2013 and 2014. A summer maize cultivar, Xianyu-335, was selected as material in the field, and 4 treatments were designed including traditional culture without waterlogging (TW₀), traditional culture with waterlogging (TW₁), broad-row ridge culture without waterlogging (RW₀) and broad-row ridge culture with waterlogging (RW₁). The results showed that the date of SPAD (soil and plant analyzer development) value and photosynthesis rate of the maize functional leaf recovering to normal level under broad-row ridge culture was 10 days earlier than that under traditional culture in waterlogging year. Therefore, the photosynthetic capacity was more quickly meliorated under broad-row ridge culture than that under traditional culture when a flood occurred. The leaf area of maize recovered to normal level 15 days after waterlogging under broad-row ridge culture in waterlogging year, but couldn't recover to normal level even 30 days after waterlogging under traditional culture. Thus, a larger green photosynthetic leaf area was provided under broad-row ridge culture than under traditional culture when in waterlogging year. The lodging resistance indicators in the third internode of maize such as stem diameter, stalk rind penetration strength and bending property in waterlogging year were worse than those in normal years under traditional culture, with a reduction rate of 20.1%, 16.1% and 20.0%, respectively. There was no significant difference for the lodging resistance capability between the 2 treatments with or without waterlogging under broad-row ridge culture. The lodging resistance capability for the 2 planting patterns had no significant difference under the same water-type years. Collectively, the capability of lodging resistance under broad-row ridge culture was more reliable than that under traditional culture. Sterile plant rate and 1 000 grain weight under broad-row ridge culture were significantly ($P<0.05$) lower than those under traditional culture in waterlogging year, with a decline of 21.5% and 5.7%, respectively. The number of grains per ear in maize in waterlogging treatment was significantly ($P<0.05$) less than that in no-waterlogging treatment under traditional culture, with a two-year average reducing rate of 11.3%, but it had no significant difference between the 2 different water-type treatments under broad-row ridge culture. So, more stable number of grains per ear was gained under broad-row ridge culture. The yield in waterlogging year was significantly ($P<0.05$) lower than that in no-waterlogging year, with a reduction of 1349.6 and 547.3 kg/hm² respectively for the 2 planting patterns, but the yield under broad-row ridge culture was not lower than that under traditional culture whether waterlogging or not. Therefore, a more stable yield was obtained under broad-row ridge culture in the areas liable to waterlogging. The research provides the reference for the high and stable yield theory and technology of summer maize in the areas liable to waterlogging.

Key words: photosynthesis; corps; moisture; summer maize; broad-row ridge culture; waterlogging at seedling stage; lodging resistance