

黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应

马玉平¹, 孙琳丽¹, 马晓群²

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 利用黄淮海地区多站点的夏玉米水分控制试验, 探讨旱涝对夏玉米发育进程、光合能力、干物质分配、叶面积扩展、产量结构及最终产量的影响, 进而分析旱涝对夏玉米生长过程的影响机制。结果表明: 干旱减缓了夏玉米营养生长阶段的发育速率, 但加快了生殖生长阶段的发育进程, 而涝渍对夏玉米发育进程的影响较小; 夏玉米全生育期土壤湿度距适宜湿度减小 1%, 其叶片最大光合速率将下降 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比叶面积上升 $8 \times 10^{-6} \text{ hm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; 夏玉米全生育期土壤相对湿度下降 1%, 其地上总干重和穗干重均下降 0.55%, 而产量将减少 $155 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 干旱不仅使玉米灌浆时间变短, 而且使叶片光合能力下降; 营养生长阶段干旱使干物质更多地分配向茎秆, 导致叶面积扩展乏力, 生殖生长阶段干旱减少干物质向贮存器官的分配而影响产量构成; 尽管干旱使叶片变薄而促进其扩展, 但仍不足以减缓干旱的整体负面影响, 最终导致玉米减产; 而涝渍主要使玉米叶片光合能力下降, 并导致干物质向穗的分配减少而减产。

关键词: 干旱; 涝渍; 夏玉米; 生理生态; 产量

中图分类号: S513 **文献标志码:** A

Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang – Huai – Hai plain

MA Yu-ping¹, SUN Lin-li¹, MA Xiao-qun²

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Quantitative effect of drought and waterlogging on photosynthetic capacity, dry matter partition, leaf area growth, yield structure and yield of maize was analyzed by using water control field test in Huang – Huai – Hai plain. The influence mechanism of drought and waterlogging on the growth of summer maize was then discussed. The results showed that drought slowed the development rate of summer maize during the vegetative growth stage, while it increased the development rate during the reproductive growth stage. Waterlogging had little effect on summer maize development. Maximum photosynthetic rate was decreased by $0.54 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and specific leaf area of summer maize became increased by $8 \times 10^{-6} \text{ hm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, while soil moisture from the appropriate humidity during the whole growth period was reduced by 1%. The total above ground dry weight and dry weight of spike of summer maize would be decreased by 0.55% and the yield would be reduced by $155 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, while soil relative moisture during the whole growth period was decreased by 1%. Drought not only shortened the filling period, but also reduced the leaf photosynthetic capacity. Drought made additional dry matter allocated to stems during the vegetative growth stage, which resulted in source shortage of leaf area expansion. It reduced the allocation to storage organs at the reproductive growth stage, which affected yield components. In general, drought casted a negative influence on the growth of maize, although it made thinner leaf and promoted its expansion. Drought finally reduced maize yield. Waterlogging decreased photosynthetic capacity and reduced the distribution of dry matter to spike, which caused reduction of maize yield.

Keywords: drought; waterlogging; summer maize; physiological ecology; yield

收稿日期: 2015-06-20

基金项目: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2014Y006); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006027)

作者简介: 马玉平(1975—), 男, 宁夏西吉人, 副研究员, 主要从事作物生长模型的研发和应用、气候变化对农业的影响以及农业气象灾害监测预警等研究工作。E-mail: mayp@camscma.cn

黄淮海流域是中国玉米生产的最重要地区之一。其中,京津冀鲁等省(市)夏玉米生长期常受干旱威胁^[1]。而淮河流域天气系统复杂多变,降水变率大,且中下游河床比降变小,地势低洼,极易形成洪涝而对夏玉米生产造成重大影响。随着气候不断变暖,中国极端天气气候事件的频率和强度出现了明显的变化。华北地区干旱趋势严重,而淮河流域降水量增加、变率增大^[2-4]。在这一背景下,探究黄淮海夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应,分析旱涝对夏玉米生长发育过程及产量形成的影响并对其进行动态监测、预测和评估非常重要。

田间试验是研究旱涝影响玉米生长发育的有效手段^[5-6]。各地试验结果表明,旱涝对玉米的光合作用以及水分利用等生理过程产生作用,进而影响产量。土壤水分过低将导致玉米叶片最大光合速率和光能利用率下降^[7],而玉米叶片的强光利用能力对干旱更敏感,弱光利用能力对干旱响应较迟钝^[8]。如果玉米开花期和雌穗小花分化期遭受水分胁迫,玉米光合性能严重受损,则可能减少光合产物对籽粒“库”的供应,最终影响产量形成^[9]。其次,旱涝对玉米产量的胁迫最终体现在对穗数、穗粒数和百粒重合理构成的影响上。干旱使玉米穗数、穗粒数和穗粒重均减少而最终导致减产^[10-12]。原因一则可能是干旱使同化物减少而造成籽粒败育^[13]。二则可能是水分缺乏影响玉米的发育进程^[14-16],使有效灌浆时间缩短而降低粒重^[17]。涝渍对玉米穗长、穗粗、单株籽粒重和群体产量有明显负效应,但对百粒重的影响不明显^[16]。另外,旱涝对夏玉米的负面影响因发生时期、严重程度及持续时间而不同。相较于拔节至抽穗期,抽穗至乳熟期遭受重旱致使玉米产量降幅更大^[18]。东北春玉米三叶~拔节期遭受干旱对最终产量影响不大,但拔节~吐丝期、吐丝~乳熟期干旱胁迫导致产量下降可达 30% 左右^[14]。一般认为,涝渍在玉米发育前期主要影响“源”的大小,后期则主要影响“库”的大小。尽管目前旱涝影响夏玉米生长发育过程的试验研究较多,但多侧重于定性了解,只给出轻旱、重旱情况下玉米反应与对照观测的比较,而缺乏与土壤湿度相关的定量分析。土壤湿度是表征作物干旱的重要因子之一,了解它与作物生长的定量关系是建立相关模式的重要依据。另外,目前的研究注重分析玉米生物量和产量结构等要素,而忽视探讨旱涝对一些生理过程的影响,如干物质分配和叶面积扩展等。作物生长模型是一种面向生长过程的机理性模型,可以用来探讨气象灾害对作物生长发育的影响^[19-20],但目前模

型对旱涝影响玉米生长发育相关过程的机制描述不够^[21-22]。

本文利用黄淮海地区多个站点的夏玉米水分控制试验数据,探讨土壤水分与玉米发育进程、光合能力、干物质分配、叶面积扩展、产量结构及最终产量的定量关系,进而分析旱涝对夏玉米生长过程的影响机制。为进一步建立旱涝损失定量评估模式或改进已有的作物生长模型提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计和观测项目

在河北固城(2009—2011 年)、河南郑州(2010 年)、山东泰安(2011—2012 年)和安徽宿州(2011 年)分别进行夏玉米生长干旱控制田间试验,在河南驻马店(2011—2012 年)进行涝渍控制田间试验。干旱处理由电动防雨棚遮蔽自然降水,根据实测土壤含水量计算补水量进行表面灌溉。其中,固城干旱试验包含 4 个水分控制和 1 个对照处理,玉米全生育期的土壤相对湿度分别控制为 > 80% (k1)、55% ~ 80% (k2)、40% ~ 55% (k3)、< 40% (k4) 以及自然降水(对照)。郑州干旱试验包含 8 个水分控制和 1 个对照处理,其土壤水分控制同固城,但控制时段分为抽穗到乳熟期(k1 ~ 4) 和拔节到抽穗期(k5 ~ 8)。泰安 2011 年干旱试验包含 3 个水分控制和 1 个对照,全生育期土壤相对湿度分别为 > 60% (k1)、40% ~ 60% (k2) 和 < 45% (k3)。泰安 2012 年和宿州 2011 年干旱试验包含 6 个水分控制和 1 个对照,其土壤水分控制同泰安 2011 年,但控制时段分为抽穗前后(k1 ~ 3) 和全生育期(k4 ~ 6)。驻马店涝渍试验中每个供试小区为 2 m × 5 m,四周铺设防渗膜。水淹深度设为 30 cm,分 3、5 d 和 7 d 等 3 种淹没持续时间,在拔节(T1 - 3) 和抽穗(T4 - 6) 两个关键发育期实施,并设 1 个土壤水分适宜的对照区。供试玉米品种为当地主栽品种,固城、泰安和郑州分别为广源旺禾 94 - 9、登海 605 和浚单 20,宿州和驻马店均为郑单 958。

田间观测项目包括玉米发育期(播种、出苗、三叶、七叶、拔节、抽穗、开花、吐丝、乳熟和成熟),主要发育期的植株地上总干重、穗干重和 LAI,以及最终的产量结构分析,每旬逢 8 测土壤湿度。观测方法依据《农业气象观测规范》^[23]。固城试验在主要发育期利用 LI - 6400 仪器进行光响应曲线的观测,获得最大光合速率($A_{\max}$)。干旱试验中,各站点不同年份夏玉米全生育期降水量在 291.8 ~ 620.9 mm 之间,为保证出苗,在播种后适量灌溉的情况下,自然

降水(对照)处理的土壤水分条件基本能够满足夏玉米的生长需要。

1.2 研究方法

干旱试验中,以其它水分处理与对照间的土壤相对湿度之差反映干旱程度,以其它处理与对照间的玉米生长部分生理指标之差表示干旱胁迫造成的损失,分析两者间的定量关系。玉米生理指标主要包括:体现光合能力的最大光合速率、影响叶面积扩展能力的比叶面积(叶面积与叶片干重的比值)、影响各器官干物质增长的分配系数(各器官增量与总增量间的比值)。同时分析土壤相对湿度与生物量、株高和产量结构等生态指标间的关系。若以上关系为线性相关,则进行回归方程的显著性检验(F 检验),给出检验统计量的概率 p 值及样本数 n 。并定义干旱程度(或土壤相对湿度)下降 1% 时,夏玉米生长生理生态指标的变化为干旱影响系数。由此分析干旱影响夏玉米生长的机制。涝渍试验中,首先计算淹水处理玉米累积生物量、各器官分配系数以及产量要素与对照之差,然后进行不同淹水间的比较,分析涝渍对玉米生长发育的影响规律。

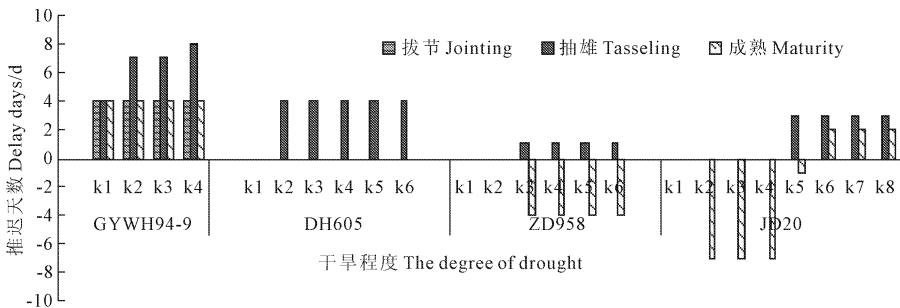
本研究对多个玉米品种的试验数据进行综合分析,以了解黄淮海流域夏玉米对旱涝的总体反应。利用固城、郑州、泰安和宿州试验数据分析干旱对夏玉米发育进程的影响;利用固城试验数据探讨干旱对夏玉米生理过程的影响;利用固城、郑州、泰安和

宿州试验数据分析干旱与夏玉米生长量、株高及产量结构的关系。利用驻马店试验数据探讨涝渍与夏玉米生长发育的关系。

2 结果与分析

2.1 干旱对夏玉米生长发育的影响

2.1.1 干旱对夏玉米发育进程的影响 黄淮海流域的夏玉米田间水分试验发现(图 1),严重的土壤水分亏缺主要导致夏玉米发育速率减缓,发育期推迟。但不同玉米品种发育进程对干旱的敏感性和反应有较大差异。固城 2010 年的夏玉米(广源旺禾 94-9)明显表现为随干旱程度加重而抽雄期不断推迟,但不同干旱程度均使成熟期推迟 4 d。这也表明,夏玉米抽雄到成熟阶段的干旱促使成熟期提前。若单独考察夏玉米抽雄到成熟阶段,则干旱使成熟期提前。泰安 2012 年的登海 605 表现为干旱使抽雄期推迟 4 d,成熟期没有变化,但抽雄到成熟阶段缩短 4 d。宿州 2011 年的郑单 958 表现为抽雄期推迟而成熟期提前,但不同干旱等级间差别不明显。郑州 2010 年的浚单 20 在拔节到抽雄期的干旱使抽雄期推迟 3 d,成熟期推迟约 2 d。但抽雄到乳熟期干旱时,玉米成熟期反而提前了 7 d。其余干旱试验对夏玉米发育进程没有明显影响趋势。总体来看,干旱可能使玉米营养生长阶段的发育进程减缓,但使生殖生长阶段的发育进程加速。



注:k1~k8的干旱程度不断加重,GYWH94-9、DH605、ZD958和JD20分别为广源旺禾94-9、登海605、郑单958和浚单20。
Note: The drought degree becomes heavier from k1 to k8. GYWH94-9, DH605, ZD958 and JD20 are Guangyuanwanghe94-9, Denghai605, Zhengdan958 and Jundan20, respectively.

图 1 干旱对不同品种夏玉米发育进程的影响

Fig.1 Effects of drought on summer maize development process of different varieties

2.1.2 干旱对夏玉米部分生理过程的影响 干旱对夏玉米光合能力有明显的负效应。图 2(左)为固城试验点前期土壤湿度对夏玉米最大光合速率(A_{max})的影响。可以看出,较大幅度的土壤湿度变化将明显影响 A_{max} ,土壤湿度降低导致最大光合能力降低。其原因主要是干旱使叶绿体蛋白降解,从而叶绿素受到破坏,减少了对辐射的吸收,而且细胞

内膜受到损伤,影响电子传递,抑制了光合磷酸化过程。另外,干旱还使气孔关闭,阻碍 CO_2 扩散,最终导致光合速率降低。干旱影响 A_{max} 的系数为 $-0.3 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。干旱对夏玉米叶面积扩展有明显的正效应。图 2(右)为土壤湿度与夏玉米比叶面积(SLA)的关系。结果表明,土壤湿度降低使 SLA 增大。干旱影响 SLA 的系数为 $8 \times 10^{-6} \text{ hm}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

SLA 增大即叶片变薄,从而在一定程度上弥补了由于干旱胁迫导致光合产物不足引起的叶片扩张乏

力。叶片变大则可以吸收更多光能从而提高整株的光合产物。这也是玉米生长对逆境的适应。

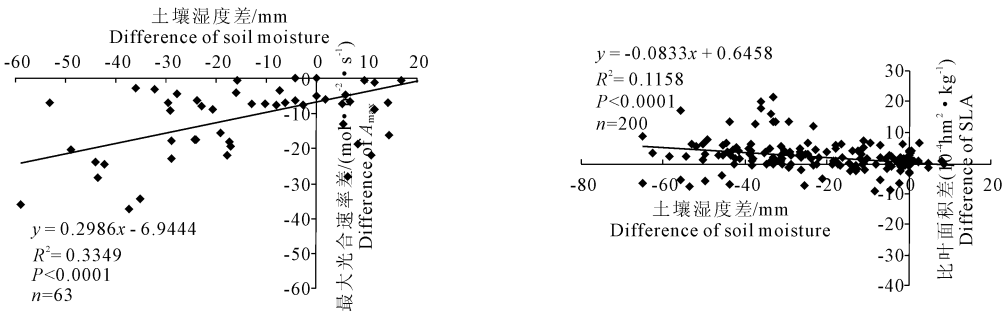


图 2 土壤水分对夏玉米最大光合速率(A_{max})和比叶面积(SLA)的影响

Fig.2 Effects of soil moisture on maximum photosynthetic rate (A_{max}) and specific leaf area (SLA) of summer maize

图 3 为前期土壤湿度与夏玉米各器官干物质分配系数间的定量关系。可以看出,在夏玉米营养生长阶段,土壤水分降低导致光合产物更多地向茎秆分配,而减少向叶片的分配。此时,干旱影响叶和茎分配的系数分别为 -0.0008 和 0.0008 。夏玉米生

殖阶段的土壤水分降低使光合产物减少向贮存器官分配,而增加向茎秆的分配。干旱影响叶和茎分配的系数均为 0.0019 ,而干旱影响穗分配的系数为 -0.0038 。这也是干旱使收获指数降低的原因。

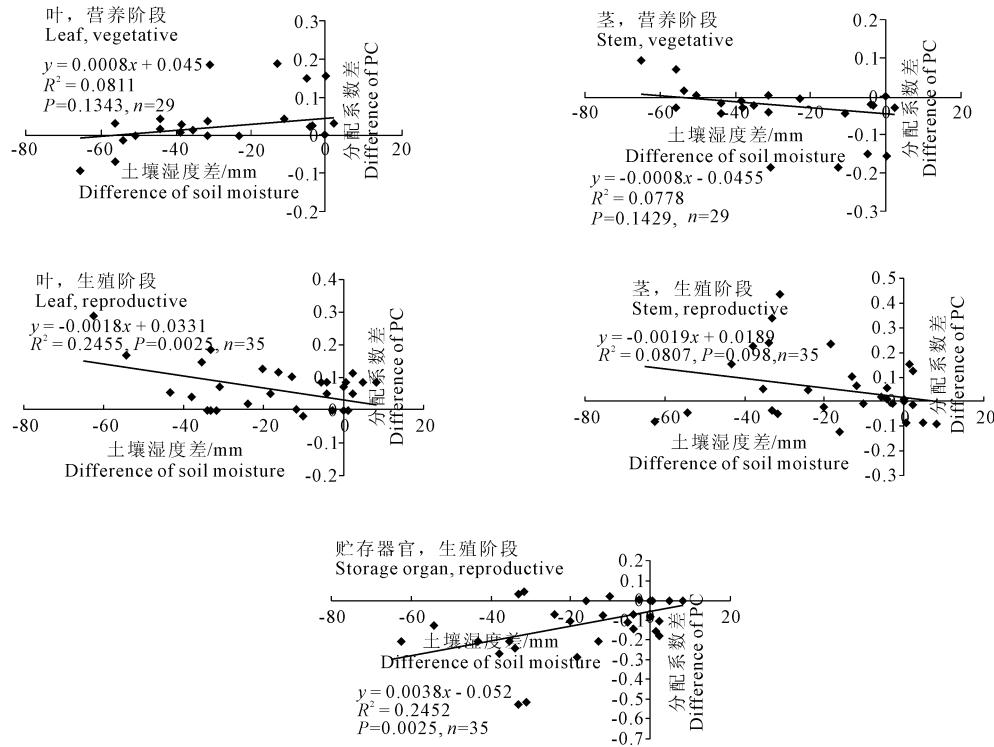
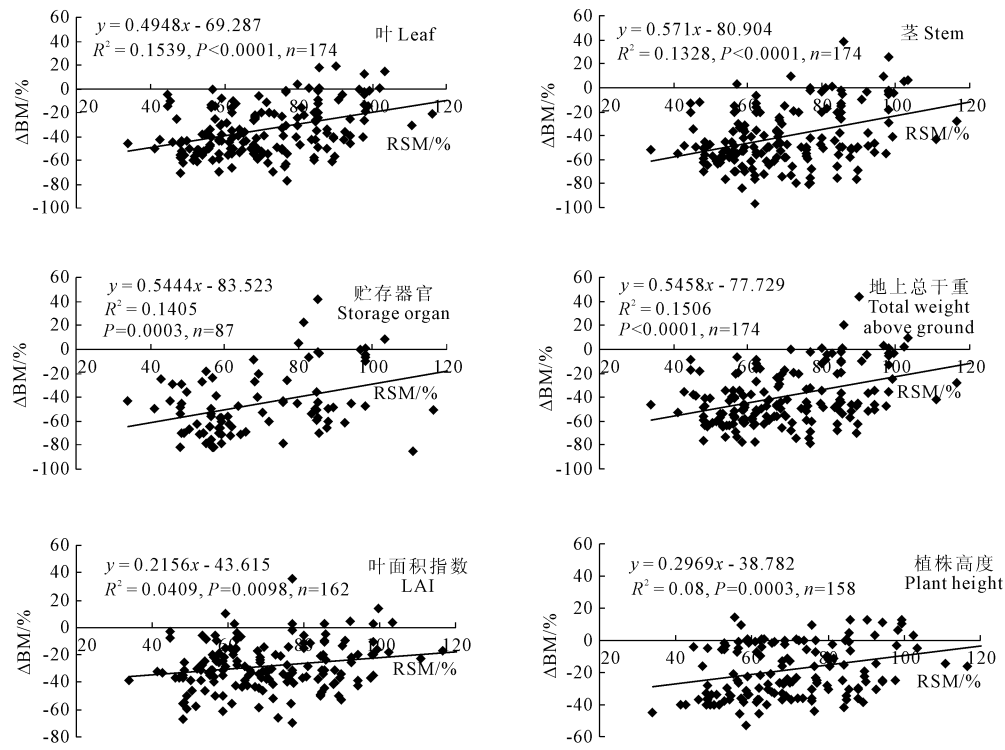


图 3 土壤湿度对夏玉米不同生长阶段干物质分配系数(PC)的影响

Fig.3 Effects of soil moisture on dry matter partitioning coefficient (PC) of summer maize at different growth stages

2.1.3 干旱对夏玉米生长量和株高的影响 干旱对夏玉米形态和生物量累积有明显的负面效应。图 4 为黄淮海夏玉米田间试验中干旱程度与生物量(或株高)损失间的相关关系。可以看出,水分胁迫导致生物量积累(或高度增长)减少量与干旱程度有较大的正相关关系,干旱程度越重则生物量损失(或

株高降低)越大。一般来看,生育期土壤相对湿度降低 1%,则地上总干重的损失为 0.55%;穗干重的损失与总干重基本相同;茎干重的损失最大,达 0.57%;叶干重损失略小,为 0.49%;LAI 的损失为 0.22%;株高可能降低 0.3%。



注:ΔBM 为水分胁迫导致生物量、LAI 或植株高度的减少量,RSM 为土壤相对湿度。下同。
注: ΔBM is reduction of biomass, LAI or plant height is due to water stress, RSM is the relative humidity of soil. The same below.

图 4 土壤湿度对夏玉米生长的影响

Fig.4 Effects of soil moisture on growth of summer maize

2.1.4 干旱对夏玉米产量结构的影响 干旱对夏玉米产量结构有明显影响。黄淮海流域的夏玉米田间水分试验发现,土壤湿度变化与玉米产量结构要素呈线性关系(图 5)。土壤湿度降低使夏玉米果穗变短变细,百粒重、单株籽粒重以及籽粒茎秆比等都降低,使秃尖比升高,最终导致产量明显降低。具体看,生育期平均土壤相对湿度降低 1%,将使穗长减少约 0.14 cm、穗粗减少约 0.03 mm、单株籽粒重降低约 2.7 g,干物质更多地向茎秆分配,使籽粒茎秆比降低约 0.02,而秃尖比升高约 0.003,最终产量降低约 155 kg·hm⁻²。

2.2 涝渍对夏玉米生长发育的影响

黄淮海地区夏玉米水分试验发现,涝渍对玉米发育进程的影响不明显。本文仅分析涝渍对夏玉米生长过程的影响。

2.2.1 涝渍对夏玉米叶片扩展和干物质分配的影响 利用河南驻马店涝渍试验分析了涝渍(淹水)对夏玉米比叶面积和分配系数的影响(图 6)。结果表明,涝渍对夏玉米叶片厚度的影响不明显,但对干物质分配有影响。前期发生 3 天以上涝渍将使干物质

在抽雄期更多向茎分配,而减少向叶和穗的分配,在乳熟期更多地分配到茎和叶,而减少向穗的分配。两生育期中,对茎分配的增加可能有 9%,对叶分配的增减比例较低,而乳熟期对穗分配减少可达 10%。

2.2.2 涝渍对夏玉米生长量及株高的影响 河南驻马店的夏玉米试验发现,涝渍(淹水)对夏玉米生长量积累有很大的负面影响(图 7)。不同时段和持续时间的淹水均导致夏玉米生长量有所减少。一般情况下,拔节期涝渍的影响较抽雄期的更大。拔节期淹水 7 d 将导致乳熟时的叶和茎重减少 50% ~ 60%,而抽雄期淹水 7 d 导致乳熟时的叶和茎重减少仅 20% ~ 30%。但两个时期的涝渍对穗重的影响都很大,造成的损失均超过 60%。

试验结果表明,涝渍使夏玉米株高明显降低。拔节期涝渍对夏玉米株高的影响显著大于抽雄期。拔节期淹水 3 d,可导致株高降低 42 cm,而淹水 5 d 株高降低 92 cm。抽雄期淹水对夏玉米株高影响较小,7 d 淹水使夏玉米株高降低幅度在 23 cm 左右(图 8)。

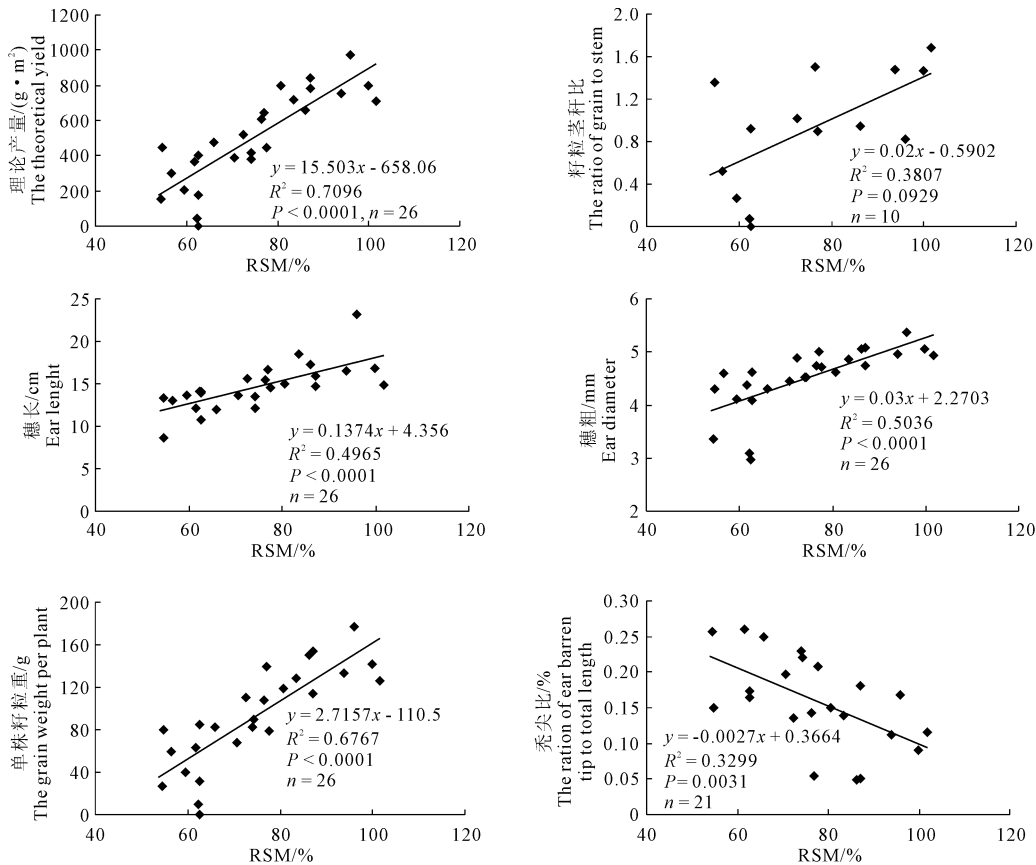


图 5 土壤湿度对夏玉米产量结构的影响

Fig.5 Effects of soil moisture on yield structure of summer maize

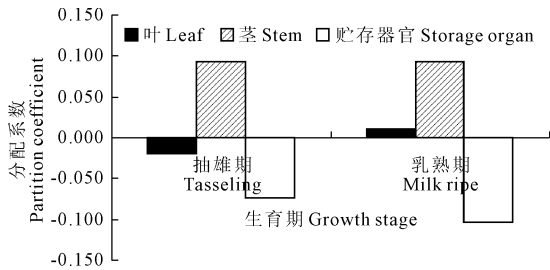


图 6 涝渍对夏玉米干物质分配系数的影响

Fig.6 Effects of waterlogging on dry matter partitioning coefficient of summer maize

2.2.3 涝渍对夏玉米产量结构的影响 涝渍对夏玉米产量结构有明显的负面影响,其大小与所处发育阶段、淹水天数有关,对产量结构不同方面的影响也不尽相同。图 9 为驻马店不同时期淹水时夏玉米产量结构相对与对照的变化。可以看出,抽雄期淹水 3 d 一般无死株,但减产率在 50%左右。而拔节期淹水 3 d 则死株率可达 25%,减产率达 58%。抽雄期淹水 7 d 导致死株率约为 45%,减产率达 84%。而拔节期淹水 7 d 可能导致死株率达 78%并绝产。

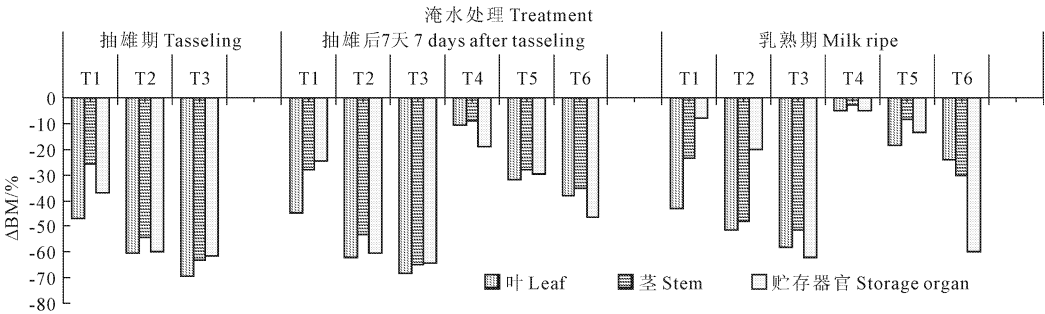


图 7 不同发育期不同淹水天数对夏玉米生物量的影响

Fig.7 Effects of different flooding days at different development stages on biomass of summer maize

注: T1、T2 和 T3 分别为拔节期淹水 3、5 d 和 7 d, T4、T5 和 T6 分别为抽雄期淹水 3、5 d 和 7 d, ΔBM 为涝渍造成生物量的减少量。
Note: T1, T2 and T3 are 3, 5 and 7 flooding days in jointing stage, respectively. T4, T5 and T6 are 3, 5 and 7 flooding days in tasseling stage, respectively. ΔBM is reduction of biomass due to waterlogging.

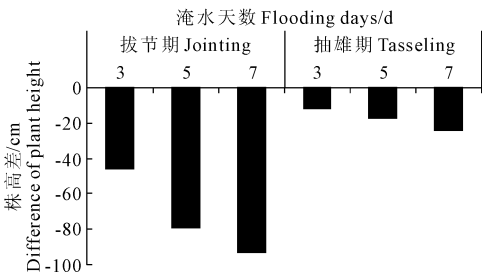


图 8 不同发育期不同淹水天数对夏玉米株高的影响

Fig.8 Effects of different flooding days at different development stages on plant height of summer maize

两个发育期涝渍对单株籽粒重的影响程度基本相同,随着淹水天数的增加而单株籽粒重的减少一般在增大。不同发育期涝渍对果穗大小的影响主要体现在长度上。拔节期淹水对果穗长的影响要比抽雄期淹水的影响大,但两者对果穗粗的影响幅度基本一致。涝渍使夏玉米果穗的秃尖长和秃尖比均有所增加,但不同发育期不同淹水时间对它们的影响规律不明显。可见,拔节期受涝对夏玉米产量要素的影响一般要明显大于抽雄期的,但抽雄期涝渍对百粒重的影响要大于拔节期的影响。

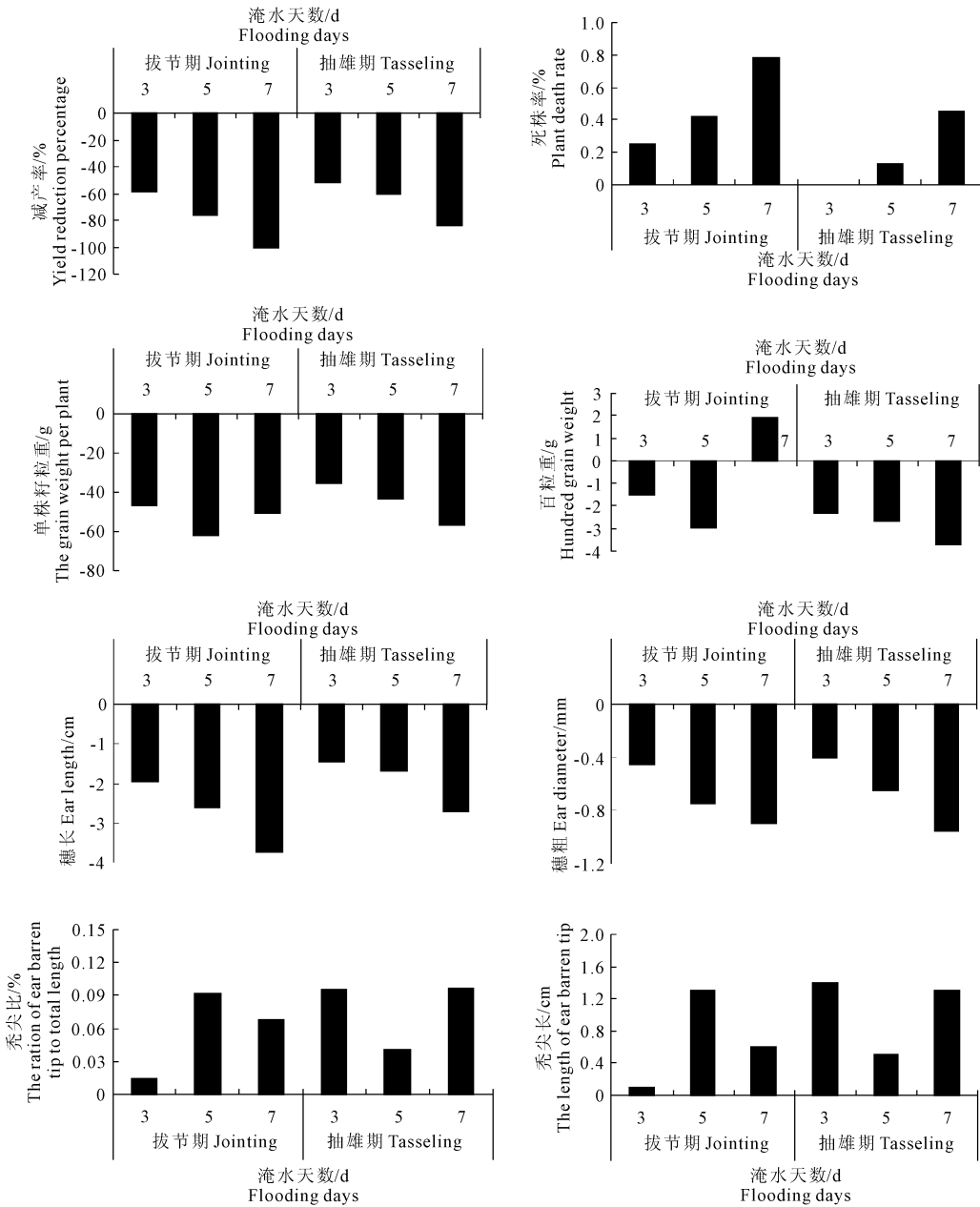


图 9 不同发育期不同淹水天数对夏玉米产量结构的影响

Fig.9 Effects of different flooding days at different development stages on yield structure of summer maize

3 讨 论

旱涝对玉米发育进程有很大影响,但不同时期的旱涝对玉米发育速率的正负效应不同。陶世蓉等的试验结果表明^[24],夏玉米苗期阶段水分胁迫,导致生育进程明显推迟,成熟期延缓。纪瑞鹏等的东北春玉米试验表明^[14],三叶~拔节期干旱胁迫使玉米生育期延长 13 d;拔节~吐丝期干旱胁迫使生育期缩短 7 d,吐丝~乳熟期的干旱使生育期缩短 15 d。本研究多个试验表明,干旱使玉米营养生长阶段的发育进程减缓,而使生殖生长阶段的发育进程加速。但仍需更多试验验证。与干旱不同,涝渍灾害一般只发生在夏玉米某一生育阶段,很少出现夏玉米全生育期涝渍的情况。席远顺等研究表明^[15],玉米苗期受涝可使抽雄期推迟 7~10 d。房稳静等在河南驻马店的积水试验发现,拔节期和抽雄期涝渍对夏玉米发育进程的影响不明显^[16]。本研究后来在驻马店的淹水试验也有相同表现。玉米雌穗吐丝若较雄穗开花晚过多,将造成授粉不良,果穗籽粒数减少,最终导致产量降低。尽管不同区域、不同玉米品种干旱试验的反映并不完全一致,但基本可以认为,在营养生长阶段,特别是该阶段的前期,干旱主要表现为抑制玉米的发育速率,而在生殖生长阶段,干旱则提高了玉米的发育速率;涝渍对玉米发育进程的影响较小。

旱涝影响玉米产量结构的原因较多。Ouattar 等研究认为^[17],水分缺乏将缩短有效灌浆时间从而使粒重降低。而 Zinselmeier 等则提出^[13],干旱使光合同化物减少而造成籽粒败育。本研究表明,除以上两者外,旱涝对同化物的分配也有很大影响,特别是生殖生长阶段干旱增加了向叶茎的分配而减少了向贮存器官的分配,最终对产量结构要素产生了负面影响。旱涝发生时期对玉米产量的影响也有较大差异。在干旱方面,孙景生等研究表明^[10-11],夏玉米拔节期重度干旱使穗粒数减少 15.9%,产量降低 19.8%,而抽雄至吐丝期缺水使穗数、单穗粒数和穗粒重均减少,减产幅度达 40.4%。郭晓华等研究发现^[12],灌浆期干旱使籽粒重下降 33.4%。纪瑞鹏等研究东北春玉米表明^[14],三叶~拔节期遭受干旱对最终产量影响不大,而拔节~吐丝期、吐丝~乳熟期干旱胁迫导致产量分别下降 29.4% 和 27.8%。姜鹏等研究表明^[18],相较于拔节至抽穗期,抽穗至乳熟期遭受重旱致使玉米产量降幅更大。本研究给出了全生育期的定量影响,干旱对百粒重和产量的影响系数分别为 -0.13 g 和 $-155\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。在涝渍

方面,Zaidi 等研究表明^[25],苗期受涝则百粒重大幅度降低,拔节期受涝则株粒数减少,小花分化期受涝则株粒数减少、百粒重降低;无论是拔节期或是抽雄期,积水 3 d 以上产量都将减产 50% 以上,拔节期积水 5 d 以上绝收,抽雄期积水 7 d 以上绝收。而房稳静等的试验表明^[16],拔节期和抽雄期涝渍对玉米果穗长、果穗粗、株籽粒重和产量有明显负效应,但对百粒重的影响不明显。本研究发现,拔节期受涝对夏玉米产量要素的影响一般要明显大于抽雄期涝渍的影响,但抽雄期涝渍对百粒重的影响要大于拔节期的影响,一般拔节期积水 7 d 以上则绝收。另外,涝渍使玉米更易发生倒伏,造成的损失甚至较涝渍影响光合和分配所造成的损失更大。总体看,营养生长阶段的干旱对玉米产量的影响要小于生殖生长阶段,而涝渍的影响正好相反。

干旱对叶片薄厚的影响最终会作用于光合产物。有研究指出,较厚的叶片中单位叶面积内的 RUBP 羧化酶通常比薄叶多,因而叶片最大光合速率可能随叶片变厚而增加^[26]。但若光合产物量不变,则薄叶的面积更大而吸收更多光能,整株的光合产物会增多。两者哪个更有利于产生更多光合产物尚需进一步探讨。另外,本研究未能分析旱涝影响不同品种夏玉米生长发育及产量形成的差异,这需要实施更多田间试验进行探讨。

4 结 论

干旱减缓了夏玉米营养生长阶段的发育速率,加速了生殖生长阶段的发育速率;涝渍对于夏玉米发育进程的影响较小。干旱不仅使玉米灌浆时间变短而造成减产,而且使玉米叶片的光合能力下降而同化物减少。干旱在营养生长阶段使干物质更多地分配向茎秆,导致叶面积扩展乏力,在生殖生长阶段减少向贮存器官的分配而对产量构成要素产生负面影响。尽管干旱使叶片变薄而促进叶片扩展,但仍不足以减缓整体的负面影响,最终导致玉米减产。涝渍使玉米叶片光合能力下降,干物质向穗的分配减少而最终减产。

致谢:河南省气象科学研究所的刘忠阳高级工程师、驻马店市气象局房稳静高级工程师,安徽宿州市气象局李德高级工程师和山东泰安市气象局齐斌高级工程师分别开展了郑州、驻马店、宿州和泰安的夏玉米水分试验,并为本文提供了相关数据,特此表示感谢。

- [1] 李全起,陈雨海,房全孝.夏玉米种植中水分问题的研究进展[J].玉米科学,2004,12(1):72-75.
- [2] 秦大河,陈振林,罗 勇,等.气候变化科学的最新认知[J].气候变化研究进展,2007,3(2):63-73.
- [3] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(Ⅰ):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8.
- [4] 卢燕宇,吴必文,田 红,等.基于 Kriging 插值的 1961—2005 年淮河流域降水时空演变特征分析[J].长江流域资源与环境,2011,20(5):567-573.
- [5] 张玉书,米 娜,陈鹏狮,等.土壤水分胁迫对玉米生长发育的影响研究进展[J].中国农学通报,2012,28(3):1-7.
- [6] 余卫东,冯利平,刘荣花.玉米涝渍灾害研究进展与展望[J].玉米科学,2013,21(4):143-147.
- [7] 卜令铎,张仁和,常 宇,等.苗期玉米叶片光合特性对水分胁迫的响应[J].生态学报,2010,30(5):1184-1191.
- [8] 吴 玮,景元书,马玉平,等.干旱环境下夏玉米各生育时期光响应特征[J].应用气象学报,2013,24(6):723-730.
- [9] 徐世昌,戴俊英,沈秀瑛,等.水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,1995,21(3):356-363.
- [10] 孙景生,肖俊夫,张寄阳,等.夏玉米产量与水分关系及其高效用水灌溉制度[J].灌溉排水,1998,17(3):19-23.
- [11] 孙景生,肖俊夫,段爱旺,等.夏玉米耗水规律及水分胁迫对其生长发育和产量的影响[J].玉米科学,1999,7(2):45-48.
- [12] 郭晓华.生态因子对玉米产量构成因素的调控作用[J].生态学杂志,2000,19(1):6-11.
- [13] Zinselmeyer C, Westgate M E, Schussler J R, et al. Low water potential disrupts carbohydrate metabolism in maize (*Zea mays* L.) ovaries[J]. Plant Physiol, 1995,107(2):385-391.

- [14] 纪瑞鹏, 车宇胜, 朱永宁, 等. 干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3021-3026.
- [15] 席远顺, 曹明, 全德旺. 夏玉米的渍害及防御对策[J]. 作物杂志, 1993, (4): 22-24.
- [16] 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.
- [17] Ouattar S, Jones R J, Crookston R K. Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development[J]. Crop Sci., 1987, 27(4): 726-730.
- [18] 姜鹏, 李曼华, 薛晓萍, 等. 不同时期干旱对玉米生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 232-235.
- [19] 马玉平, 王石立, 李维京. 基于作物生长模型的东北玉米冷害监测预测[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1868-1878.
- [20] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1762-1769.
- [21] 罗毅, 郭伟. 作物模型研究与应用中存在的问题[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 307-312.
- [22] 曹宏鑫, 赵锁芳, 葛道阔, 等. 作物模型发展探讨[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [23] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 1-212.
- [24] 陶世蓉, 东先旺, 张海燕, 等. 土壤水分胁迫对夏玉米植株性状整齐度的影响[J]. 西北植物学报, 2000, 20(5): 812-817.
- [25] Zaidi P H, Mani Selvan P, Sultan Rafat, et al. Association between line per se and hybrid performance under excessive soil moisture stress in tropical maize (*Zea mays* L.)[J]. Field Crops Research, 2007, 101(1): 117-126.
- [26] Penning De Vries F W T, Jansen D M, Ten Berge H F M, et al. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops[M]. Wageningen, The Netherlands: Pudoc, 1989: 271.

- [4] Dasberg S, Or D. Drip Irrigation[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1999. 162.
- [5] 王振华, 杨培玲, 郑旭荣, 等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分动态[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 149-159.
- [6] 李玉义, 逢焕成, 陈 阜, 等. 膜下滴灌对风沙土盐分变化和棉花产量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 96-100.
- [7] 尹海龙, 田长彦. 不同盐度环境下盐地碱蓬幼苗光合生理生态特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 850-855.
- [8] Chen T H H, Murata N. Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: Mechanisms and biotechnological applications[J]. Plant, Cell and Environment, 2011, 34: 1-20.
- [9] Mokded R, Siwar F, Jihene J, et al. Phytodesalination of a salt-affected soil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop[J]. Bioresource Technology, 2010, 101: 6822-6828.
- [10] 王振华, 郑旭荣, 宋常吉. 滴灌对北疆复播油菜耗水和生长的影响效应[J]. 核农学报, 2014, 28(5): 0919-0928.
- [11] 宋常吉. 北疆滴灌复播作物需水规律及灌溉制度研究[D]. 石

河子;石河子大学,2013.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[13] 俞仁培,陈德明.我国盐渍土资源及其开发利用[J].土壤通报,1999,30(4):158-159,177.

[14] Goldberg D, Gornat B, Rimón D. Drip irrigation – principles, design and agricultural practices[M]. Kfar Shmariahu, Israel: Drip irrigation Scientific Publications, 1976.

[15] Bresler E. Two-dimensional transport of solute during nonsteady infiltration from trickle source[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1975,39:604-617.

[16] 赵新凤,王 炜,张 涛,等.塔里木河下游地区滴灌沙枣防护林地土壤盐分分布特征[J].中国沙漠,2012,32(3):763-770.

[17] 张 谦,祁 虹,冯国艺,等.滨海盐碱地棉田土壤水盐动态变化规律及对棉花生长发育影响[J].河北农业大学学报,2014,37(1):6-10.

[18] 赵振勇,张 科,王 雷,等.盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J].中国沙漠,2013,33(5):1420-1425.

[19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982,33:317-345.