

崔毅, 金菊良, 蒋尚明, 等. 不同受旱胁迫下大豆蒸发蒸腾与地上部生长物质之间响应关系研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 79–87. [CUI Yi, JIN Juliang, JIANG Shangming, et al. Study on Response Relationship between Evapotranspiration and Aboveground Growth Matter of Soybean under Different Drought Stress [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 79–87. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.014.]

## 不同受旱胁迫下大豆蒸发蒸腾与地上部 生长物质之间响应关系研究<sup>\*</sup>

崔毅<sup>1,2</sup>, 金菊良<sup>1,2</sup>, 蒋尚明<sup>3</sup>, 周玉良<sup>1,2</sup>, 吴成国<sup>1,2</sup>, 宁少尉<sup>1,2</sup>

- (1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009;
3. 安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 合肥 233088)

**摘 要:** 农业旱灾损失形成过程中存在着大量的不确定性, 不同受旱胁迫下作物蒸发蒸腾与生长物质积累之间的定量响应关系是解析该过程的基础, 对指导区域抗旱减灾具有重要意义。基于淮北平原两季夏大豆盆栽受旱试验, 分别构建了收获时植株地上部生物量与籽粒产量之间、受旱当期和受旱后复水各生育阶段蒸发蒸腾量与同期地上部生物积累量之间的函数关系, 并对不同阶段受旱胁迫下的产量构成要素响应进行了定量分析。结果表明, 不同受旱胁迫下大豆收获时地上部生物量与籽粒产量之间均呈显著正相关(2015、2016 季相关系数分别为 0.91 和 0.78), 籽粒产量与各阶段不断积累的地上部总生物量存在定量转化; 大豆某一生育阶段受旱当期的蒸发蒸腾量与该阶段的地上部生物积累量呈显著正相关, 且在花荚期更为明显; 某一阶段受旱对后续各生育阶段的蒸发蒸腾与地上部生长均产生影响, 且两者具有一定的相关性, 但距受旱时期越远相关性越弱; 大豆在营养生长阶段受旱后复水, 鼓粒期的地上部生长机制恢复正常, 且这种恢复效应在前期轻度受旱后更为明显; 不同阶段受旱造成的籽粒产量损失差异较大, 与充分灌溉相比, 大豆分别在苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期遭受干旱时, 2015 季和 2016 季的籽粒产量分别减少了 14.2% 和 28.0%、18.2% 和 30.5%、53.1% 和 56.2%、50.1% 和 45.2%, 花荚期和鼓粒期受旱对籽粒形成的不利影响更为严重; 两季鼓粒期受旱胁迫下的收获时地上部生物量和千粒重均为最低。

**关键词:** 作物受旱响应; 蒸发蒸腾; 生长物质积累; 盆栽试验; 夏大豆; 淮北平原

**中图分类号:** S274; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)04-0079-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.014

农业旱灾是当今全球发生频繁、持续时间长、影响范围广的重大自然灾害之一<sup>[1-2]</sup>, 严重威胁国家粮食安全和社会稳定。近年来, 随着气候变化和人类活动影响的加剧, 农业旱灾的发生频率、致灾强度和影响范围显著增大, 已成为制约许多国家和地区社会经济持续稳定发展的瓶颈因素之一<sup>[3]</sup>。受旱胁迫下植株蒸发蒸腾与生长物质积累之间的定量响应关系是从作物生长过程角度解析农业旱灾损失形成机制、揭示农业干旱致灾机理的基础<sup>[4-5]</sup>。

目前研究较多的是作物蒸发蒸腾量与产量之间关系的表达式, 其中以作物全生育期总蒸发蒸腾量与产量之间的二次函数<sup>[6-8]</sup>和各生育阶段蒸发

蒸腾量与产量之间的 Jensen 模型<sup>[9-11]</sup>较为常见。总体看来, 在适宜的土壤水分条件下, 作物蒸发蒸腾量与产量基本呈线性关系, 随着耗水量从正反两个方向超越适宜土壤水分区间, 两者之间的关系形式发生变化, 但整体上呈抛物线函数。然而, 作物生长和产量形成对干旱胁迫的响应是一个十分复杂的物理化学过程<sup>[12]</sup>, 当干旱胁迫达到一定程度后, 胁迫影响先传递到作物生理过程, 再传递到作物生长过程, 最终导致作物产量的减少<sup>[13]</sup>。因此, 仅依据植株蒸发蒸腾量与产量之间的响应关系并不能完全解析作物从受旱胁迫到生长指标受损最终到产量减少的旱灾损失形成过程, 尚需建立不同受旱胁迫下作物各生育阶段蒸发蒸

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021-03-17 修回日期: 2021-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1502405); 国家自然科学基金项目(52109009); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(JZ2020HGQA0202, JZ2021HGTA0165)

第一作者简介: 崔毅(1990-), 男, 安徽铜陵人, 博士, 讲师, 主要从事水旱灾害风险方面的研究. E-mail: cuiyi9007@163.com

通讯作者: 金菊良(1966-), 男, 江苏吴江人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事结构水资资源学方面的研究.

E-mail: JINJL66@126.com

腾量与生长指标之间的定量关系,为从作物生长全过程角度揭示作物旱灾损失形成机制提供重要转换环节。

研究表明,作物产量的形成与植株干物质的积累与运转关系密切。马小龙等<sup>[14]</sup>对农户的小麦生产情况进行调研发现,小麦生物量每增加 1 000 kg/hm<sup>2</sup>,籽粒产量增加 430 kg/hm<sup>2</sup>。此外,作物在遭受干旱胁迫后,生物量和产量构成等指标相比充分灌溉均会发生不同程度的抑制。郑盛华和严昌荣<sup>[15]</sup>通过玉米苗期中度和重度受旱试验发现,茎粗、叶片数和总叶面积与充分灌溉相比均有不同程度的减少;李明达和张红萍<sup>[16]</sup>采用盆栽控水试验发现,在豌豆苗期、初花期及荚果充实期实施干旱胁迫,根、冠干物质积累均受到抑制,且随着胁迫强度和胁迫时间的增加,根、冠干物质的积累速率显著或极显著降低;JUMRANI 和 BHATIA<sup>[17]</sup>通过温室试验发现,大豆在营养生长和生殖生长阶段遭受干旱胁迫均造成干物质和产量的减少;WEI 等<sup>[18]</sup>采用盆栽试验发现,与充分灌溉相比,大豆各生育阶段受旱均造成叶面积、地上部生物积累量和籽粒产量的减少;高宏云等<sup>[19]</sup>通过土柱试验发现,在棉花吐絮期,与充分灌溉相比,蕾花铃干物质在轻度和中度受旱胁迫下分别减少 30.44% 和 52.22%。另外,WERF 等<sup>[20]</sup>构建 Yield-SAFE 模型时指出,作物地上部干生物量与蒸发蒸腾量具有线性关系;苏涛等<sup>[21]</sup>分析土壤水分与作物地上部生物量之间关系发现,作物蒸腾消耗的水分质量与同期积累的干物质质量之比在一定时期是定值,蒸腾消耗的水分越多,积累的干生物量就越多;魏永霞等<sup>[22]</sup>通过水稻耗水试验发现,抽穗开花期蒸发蒸腾量与阶段最大干物质积累量呈显著正相关;仝锦等<sup>[23]</sup>采用小麦试验发现,播种期-拔节期、拔节期-开花期阶段蒸发蒸腾量与花前干物质积累量显著或极显著相关,开花-成熟期阶段蒸发蒸腾量与花后干物质积累量显著相关;蔡福等<sup>[24]</sup>运用 WOFOST 模型模拟作物生长发现,高温促进作物维持呼吸速率的增大,导致用于呼吸的同化物消耗增大,从而使地上部生物量减小。然而,由于受旱胁迫下作物生长过程中存在着大量的不确定性,其相关研究一直都是自然灾害学界的前沿和难点<sup>[25]</sup>。目前多数研究主要关注的是作物受旱当期蒸发蒸腾量与最终产量或当期生长指标之间的关系,而对于作物受旱后各生育阶段蒸发蒸腾量与生物积累量之间的定量响应关系研究尚少,这严重限制了作物旱灾损失形成过程的物理解析,亟需研究。因此,有必要结合典型农业干旱区域作物受旱试验,量化不同受旱胁迫下(受旱当期和受旱后期)作物各生育阶段蒸发蒸腾量与生物积累量之间的响应关系。

大豆是中国重要的粮食和油料作物之一,随着人口的增长和生活水平的提高,大豆产品的消费需求日益增加<sup>[26]</sup>。淮北平原是高蛋白大豆主产区,以夏播为主,种植面积常年约在  $70 \times 10^4 \sim 80$

$\times 10^4 \text{ hm}^2$ <sup>[27]</sup>。淮北平原夏大豆以雨养为主,但该区域地处典型的半干旱半湿润季风气候过渡区<sup>[28]</sup>,降水年际变化大、年内分布不均,且夏季气温较高,再加上近年来气候变化引起的降水、温度异常,导致大豆生育期内旱灾频发,严重影响大豆产量。因此,准确识别大豆在不同受旱条件下各生育阶段蒸发蒸腾量与生物积累量之间的定量关系,对诊断淮北平原夏大豆旱灾损失形成薄弱环节,制定科学有效的灌溉策略具有重要意义。基于此,本研究根据淮北平原两季夏大豆盆栽受旱试验,分别建立收获时植株地上部生物量与籽粒产量之间、受旱当期和受旱后期大豆各生育阶段蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的定量关系,并对不同阶段受旱胁迫下大豆产量构成要素的定量响应进行分析,以期更精细完整地从事物地上部生长全过程角度解析农业旱灾损失成因机理,为保证淮北平原夏大豆高产稳产奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

夏大豆盆栽受旱试验在安徽省水科院新马桥农水综合试验站进行,该站位于蚌埠市、淮河北部(33°09'N, 117°22'E)。试验站地处典型的亚热带季风气候和温带季风气候过渡区域,多年来降水年际变化大、年内分布不均,干旱灾害频发<sup>[29]</sup>。两季试验期均为 2015 年和 2016 年的 6—9 月,期间试验站实测气象要素如图 1 所示。

### 1.2 作物管理

两季盆栽大豆均种植在塑料桶中,2015 季桶上部内径 28 cm,底部内径 20 cm,高 27 cm,每个空桶均装入风干土 15 kg;2016 季桶上部内径 31 cm,底部内径 23 cm,高 27 cm,每桶装入风干土 17 kg。所有空桶在装土前测定重量。供试土壤采自试验站大田耕作层,为安徽省淮北平原地区典型的砂姜黑土,其表层土壤特性见文献[4]。为保证豆种萌发,播种前将各盆栽土壤灌溉至田间持水量,并每桶随之施入复合肥 4 g(N 15%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15%, K<sub>2</sub>O 15%)。所有盆栽均放置在开放环境中,但布设有移动雨棚,用以隔绝降水。盆栽中的土壤水分仅由人工灌溉补充。对于所有盆栽样本,试验期间除水分管理外,其他作物管理措施均完全一致,保证植株正常生长发育,无病虫害影响。供试大豆品种为中黄 13,2015 季试验于 2015 年 6 月 20 日播种,7 月 3 日出苗整齐,7 月 4 日起开始试验处理,9 月 20 日收获,2016 季试验期为 7 月 15 日(开始试验处理)至 9 月 27 日(收获)。

根据安徽省淮北平原地区夏大豆的大田种植密度,本试验中每桶定苗长势均匀的大豆幼苗 3 株。结合试验站多年夏大豆实际生长记录和相关研究<sup>[30-31]</sup>中对大豆生育阶段的划分,本研究中将大豆全生育期划分为苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期 4 个生育阶段,具体划分依据和划分结果见文献[4]。

### 1.3 试验设计

两季大豆盆栽试验中均设置 9 种试验处理, 包括充分灌溉处理和 8 种受旱处理, 具体试验设计见表 1。为评估和比较大豆不同生育阶段受旱对蒸发蒸腾与地上部生长之间响应关系的影响, 本试验仅对单一生育阶段设置受旱胁迫, 且试验处理的每个生育阶段结束后均进行破坏试验, 测定该阶段内植株的地上部生物积累量。本试验控制因素为大豆不同生育阶段的盆栽土壤含水量, 即通过控制大豆各生育阶段盆栽土壤含水量的下限设置不同试验处理。结合试验站多年作物受旱试验和相关研究<sup>[30, 32-33]</sup>中的灌溉试验设计, 本试验中共设置 3 个土壤含水量下限, 分别为田间持水量的 75%、55% 和 35%, 分别对应无受旱胁迫、轻度

受旱胁迫和重度受旱胁迫 3 个胁迫水平。具体地, 两季试验均分别在大豆苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期 4 个生育阶段设置轻度和重度受旱 2 个胁迫水平、其他生育阶段无受旱胁迫, 分别对应受旱处理 T1-T8; 另设大豆全生育期无受旱胁迫, 对应充分灌溉处理 CK, 即对照组。9 种试验处理中大豆 4 个生育阶段的土壤含水量控制下限见表 1。

本试验中, 为测定各处理下大豆每个生育阶段内的地上部生物积累量, 各阶段结束后均进行破坏试验。为此, 两季试验中各处理在苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期结束后均设置 5 个盆栽样本进行破坏试验(2016 季 CK 在鼓粒期结束后设置 15 个盆栽样本), 测定各阶段内植株地上部生物量。两季试验均采用完全随机试验设计。

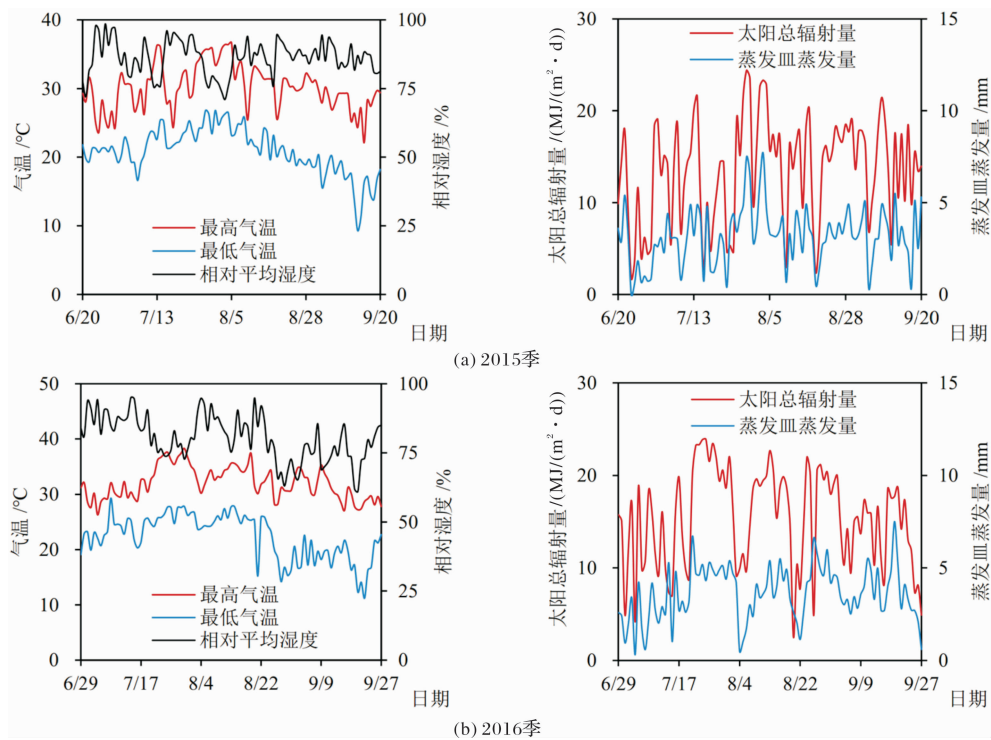


图 1 两季夏大豆受旱试验期间试验站实测逐日气象要素

表 1 两季夏大豆受旱胁迫试验设计

试验 处理 编号	各生育阶段土壤含水量下限 (占田间持水量的百分比)/%				各生育阶段土壤含水量 达到下限所需平均天数/d				各生育阶段土壤含水量 达到下限平均次数/次				试验处理说明
	苗期	分枝期	花荚期	鼓粒期	苗期	分枝期	花荚期	鼓粒期	苗期	分枝期	花荚期	鼓粒期	
T1	55	75	75	75	6	2	1	1	3	11	13	25	苗期轻度受旱
T2	35	75	75	75	11	3	1	1	1	10	14	23	苗期重度受旱
T3	75	55	75	75	2	4	2	1	8	8	12	22	分枝期轻度受旱
T4	75	35	75	75	2	9	3	1	8	2	11	20	分枝期重度受旱
T5	75	75	55	75	2	1	3	1	7	13	8	19	花荚期轻度受旱
T6	75	75	35	75	2	1	7	2	8	12	3	17	花荚期重度受旱
T7	75	75	75	55	2	1	1	3	8	12	14	11	鼓粒期轻度受旱
T8	75	75	75	35	2	1	1	7	8	13	13	3	鼓粒期重度受旱
CK	75	75	75	75	2	1	1	1	9	13	14	25	全生育期充分灌溉, 对照组

## 1.4 测定项目及方法

### 1.4.1 盆栽重量

大豆出苗后第  $j$  天的盆栽重量由  $W_j$  表示 (kg)，通过电子天平测定 (型号 YP30KN)。豆种萌发至植株收获的试验期间，每日 18:00 左右测定所有大豆盆栽样本重量。

### 1.4.2 土壤含水量

大豆盆栽的土壤含水量根据盆栽重量数据计算得到，并由重量含水量 (kg/kg) 转换为体积含水量 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )。

### 1.4.3 灌溉量

大豆出苗后第  $j$  天的灌溉量  $I_j$  由盆栽土壤含水量和该盆栽试验处理对应的土壤含水量下限共同确定 (mm)。当大豆出苗后第  $(j-1)$  天末的盆栽土壤含水量低于试验处理对应下限时，第  $j$  天盆栽灌溉至田间持水量的 90%。每日 07:00 左右实施灌溉，水量通过量杯和量筒精确控制。

### 1.4.4 植株蒸发蒸腾量

大豆盆栽实际水分消耗量可通过盆栽重量和灌溉量由下式计算得到：

$$ET_{e,j} = W_{j-1} + I_j - W_j \quad (1)$$

式中： $ET_{e,j}$  表示盆栽大豆出苗后第  $j$  天的蒸发蒸腾量 (mm)。

### 1.4.5 植株地上部生物量

待每个生育阶段结束后，取盆栽进行破坏试验。具体地，将每个盆栽中的 3 株完整大豆地上、地下部分离，取地上部 (茎、叶、豆荚和籽粒) 进一步分离后用水浸泡，洗净后用吸水纸擦干，置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min，75℃ 恒温烘干至恒重，放入干燥器中冷却，再用电子天平 (型号 TD30K-0.1) 称得 3 株大豆地上部干物质质量总和，即为植株地上部生物量。大豆某一生育阶段内的地上部生物积累量为该阶段末与上一阶段末植株地上部生物量之差：

$$B_{a,m} = \begin{cases} B_m, & m=1; \\ B_m - B_{m-1}, & m=2, 3, 4. \end{cases} \quad (2)$$

式中： $B_{a,m}$  表示大豆第  $m$  个生育阶段的地上部生物积累量， $g$ ， $B_m$ 、 $B_{m-1}$  分别表示大豆第  $m$  和  $(m-1)$  个生育阶段末的地上部生物量， $g$ ， $m=1, 2, 3, 4$  分别表示大豆苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期。

## 2 结果与分析

### 2.1 收获时大豆地上部生物量与籽粒产量之间的响应关系

2015 季和 2016 季所有试验处理 (T1-T8 和 CK) 下大豆收获时地上部生物量样本均值与相应籽粒产量之间的关系如图 2 所示。由图 2 可看出，两季试验不同受旱条件下收获时植株地上部生物量与籽粒产量之间均呈显著正相关 (2015 季、2016 季  $R^2$  分别为 0.91 和 0.78)。说明大豆籽粒产量与其各生育阶段不断积累所得的地上部总生物量存在定量转化关系，不同处理下各阶段的地上部生

物积累量不同，造成收获时地上部总生物量及其最终转化为的产量差异较大，这为定量解析受旱胁迫下大豆损失形成过程提供了思路。具体地，可先识别某一受旱胁迫下大豆各生育阶段地上部生长定量响应，确定各阶段地上部生物积累量和收获时地上部总生物量，再依据总生物量向籽粒产量的转化关系 (收获指数)，逐步解析该胁迫下植株地上部生长到最终产量损失形成的复杂过程。

另外，需进一步探析不同受旱条件下大豆各生育阶段地上部生长与同期蒸发蒸腾之间的定量关系，分别构建受旱当期和受旱后期各阶段植株蒸发蒸腾量与相应地上部生物积累量之间的函数方程，为逐步解析受旱胁迫下大豆植株从各生育阶段蒸发蒸腾响应、到地上部生长响应、最终到籽粒产量响应的复杂过程奠定基础。

### 2.2 受旱当期大豆蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的响应关系

大豆各单生育阶段受旱当期植株蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的响应关系如图 3 所示。由图 3 可知，两季大豆不同阶段受旱当期蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间均呈显著正相关关系，相关系数均高于 0.75，且花荚期 (图 3c) 的相关系数最大 (2015 季、2016 季  $R^2$  分别为 0.93 和 0.92)、苗期 (图 3a) 最小 (2015 季、2016 季  $R^2$  分别为 0.83 和 0.78)。说明大豆某一生育阶段受旱，植株地上部生长过程与该阶段的蒸腾作用密切相关，当期受旱越严重，植株蒸发蒸腾量越小，导致当期地上部生物积累量越少，且这种相关关系在花荚期更为明显。

两季大豆 4 个生育阶段在不同受旱胁迫下当期植株蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间线性函数的斜率从大到小的顺序一致，均为花荚期 (2015 季、2016 季斜率分别为 0.32 和 0.27) > 分枝期 > 鼓粒期 > 苗期 (2015 季、2016 季斜率分别为 0.06 和 0.15)，说明大豆花荚期受旱当期地上部生长过程对蒸腾作用的响应最为敏感，苗期最不敏感，即 4 个生育阶段分别受旱、减少相同的蒸发蒸腾量，花荚期造成的当期地上部生物积累量相对充分灌溉损失值最大，苗期最小。花荚期是大豆生长发育的关键时期，营养生长和生殖生长并行，需水量大，这时植株遭受干旱胁迫对蒸腾机制和地上部生长的不利影响均相对较大，因此有必要保证这一阶段的水分供应。

由图 3 可知，大豆某一生育阶段受旱使得该阶段的蒸发蒸腾量和地上部生物积累量相对无受旱胁迫均发生减少，且减少量均与该阶段的受旱程度成正比；此外，植株蒸发蒸腾减少量与地上部生物积累减少量呈显著正相关，说明大豆当期受旱直接影响其当期的蒸腾作用，并通过植株生长机制传递影响当期的地上部物质积累过程。因此，可结合大豆各生育阶段受旱当期蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的定量关系，进一步从受旱使得当期蒸发蒸腾量减少到当期生物积累量下降最终到籽粒产量降低的思路深入解析大豆旱灾损失形成过程。

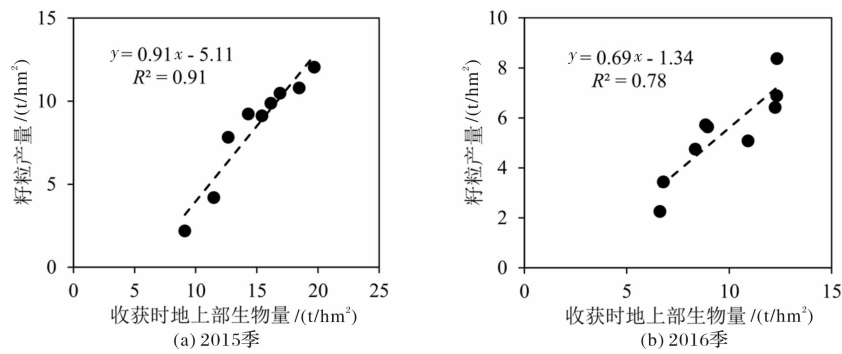


图2 不同受旱条件下大豆收获时地上部生物量与籽粒产量之间的关系

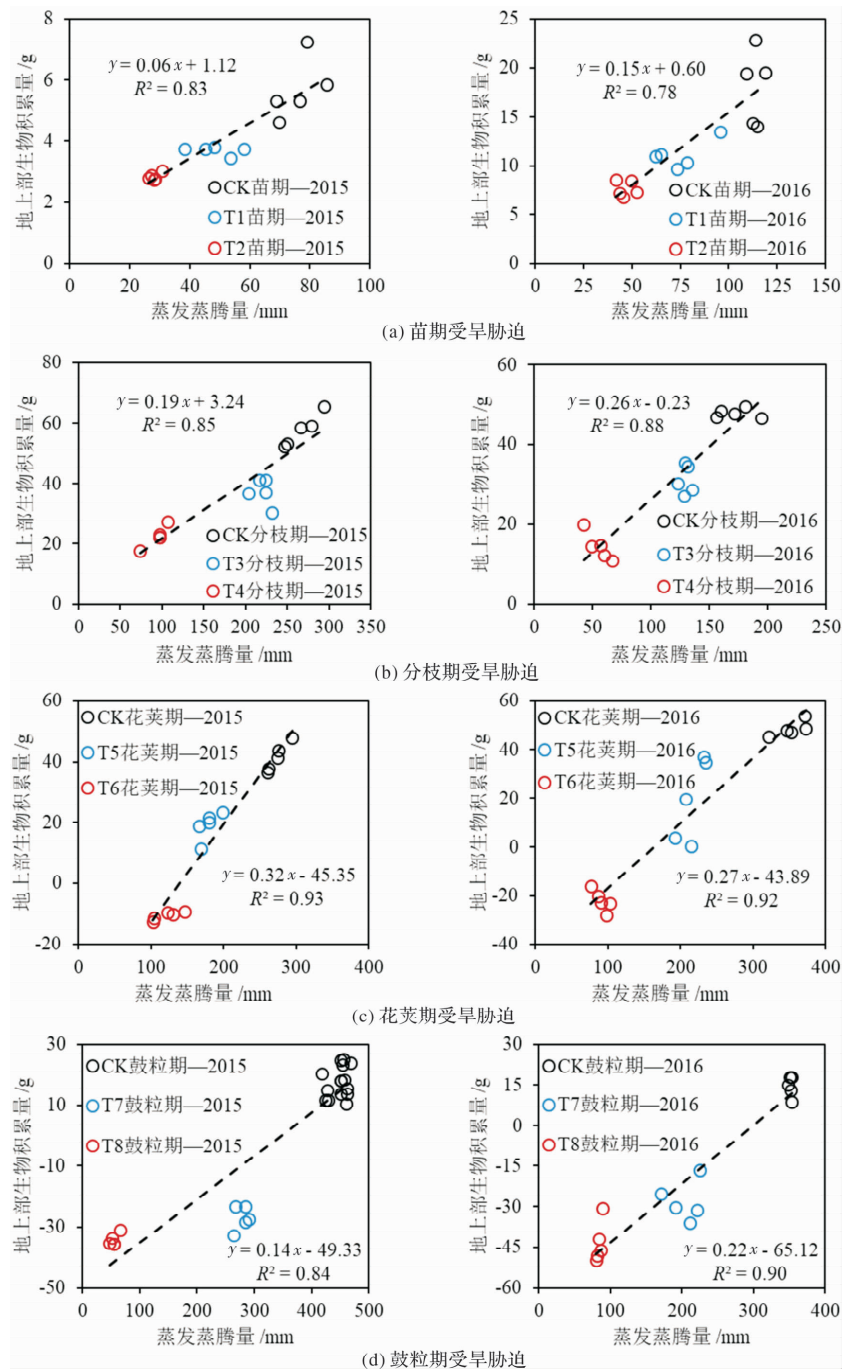


图3 受旱当期大豆各生育阶段不同试验处理下蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的关系



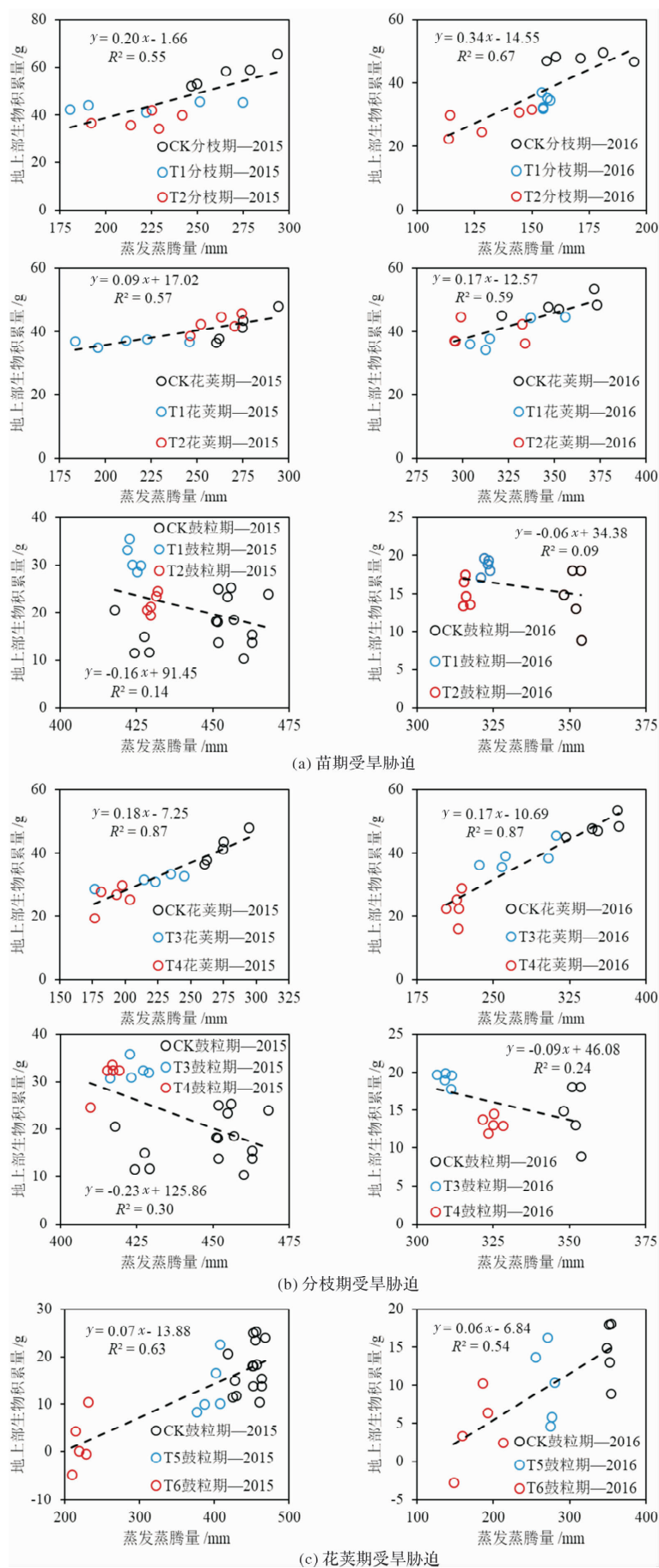


图4 大豆不同试验处理后各生育阶段蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的关系

### 2.3 受旱后期大豆蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的响应关系

大豆某一生育阶段受旱结束后各阶段植株蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 两季大豆在遭受干旱胁迫之后复水的各生育阶段蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间均存在一定的相关关系, 但相关程度随生育阶段的进行而不断降低: 两季大豆在苗期受旱后恢复充分供水, 分枝期、花荚期和鼓粒期植株蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的相关程度逐渐减弱(图 4a 中各生育阶段线性函数相关系数逐渐减小, 两季分枝期、花荚期和鼓粒期的  $R^2$  平均值分别为 0.61、0.58、0.12); 在分枝期受旱后复水, 鼓粒期蒸发蒸腾量与生物积累量之间的相关性明显低于花荚期(图 4b 中鼓粒期的相关系数小于花荚期, 两季花荚期和鼓粒期的  $R^2$  平均值分别为 0.87、0.27); 在花荚期受旱后复水, 鼓粒期两者之间的相关程度仍较高(图 4c 中两季鼓粒期的  $R^2$  平均值为 0.59)。说明大豆某一生育阶段受旱对后续阶段植株蒸发蒸腾与地上部生长过程这两者造成的影响之间具有一定的相关性, 但距受旱时期越远的生育阶段两者之间的相关性越弱。

此外由图 4 可知, 大豆在苗期和分枝期受旱后复水, 鼓粒期植株蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间均呈现较弱的负相关关系(图 4a 和图 4b 中两季鼓粒期线性函数的斜率均为负值), 且前期受旱(轻旱和重旱)的植株蒸发蒸腾量仍低于无受旱胁迫, 而地上部生物积累量却高于无受旱胁迫。说明大豆在生长前期(营养生长阶段)遭受干旱胁迫后恢复充分供水, 后续生育阶段中受损的植株蒸腾作用仍未恢复至正常状态, 而鼓粒期植株的地上部生长机制已恢复正常, 甚至出现生长补偿效应, 使得该阶段地上部生物积累量超过对应充分灌溉下的值, 且这种地上部生长补偿效应在前期轻度受旱后复水的鼓粒期(T1 鼓粒期和 T3 鼓粒期)更为显著。

结合图 3 和图 4 可知, 大豆某一生育阶段蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的响应关系并不总是简单的线性函数, 该响应关系与植株在该阶段当前和之前的受旱情况密切相关, 研究时需分别考虑某一阶段当前受旱和之前受旱两种情况下蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的关系, 这

反映出大豆受旱胁迫复杂的响应机制和旱灾损失形成过程中的不确定性。此外, 大豆在某一生育阶段遭受干旱胁迫不仅造成该阶段蒸发蒸腾量和地上部生物积累量的损失, 且会产生后效影响, 使得受旱之后多个阶段的蒸发蒸腾量和地上部生物积累量相对充分灌溉也发生减少。然而, 不同受旱胁迫下大豆各生育阶段蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的定量关系, 是解析其从蒸发蒸腾到地上部生长再到籽粒产量形成这一农业干旱致灾安全过程的基础。因此, 有必要在解析大豆受旱当期蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间关系的基础上, 进一步探究受旱后复水各阶段两者之间的定量响应关系。

### 2.4 大豆产量构成要素对各生育阶段受旱胁迫的定量响应

2015 季和 2016 季不同试验处理下的大豆产量构成要素见表 2, 主要包括收获时植株地上部生物量、籽粒产量和千粒重, 反映不同生育阶段受旱胁迫对大豆产量形成的影响。由表 2 可知, 两季试验中不同处理之间的籽粒产量差异均非常显著( $p \leq 0.001$ ), 干旱胁迫对大豆籽粒形成具有不利影响, 籽粒产量损失随各生育阶段胁迫程度的增加而增加。例如, 与对照组 CK(充分灌溉)相比, 两季试验中处理 T3 的籽粒产量分别减少了 13.0% (2015 季) 和 17.7% (2016 季), T4 的籽粒产量分别减少了 23.4% (2015 季) 和 43.3% (2016 季)(表 2)。同样, SINCİK 等<sup>[32]</sup>在大田研究中发现, 充分灌溉处理下的大豆籽粒产量最高, 而亏缺灌溉处理(灌溉量为对应充分灌溉处理的 25%、50% 和 75%)造成籽粒产量 11.7% - 27.4% 的减少。

然而, 不同生育阶段的受旱胁迫造成的大豆籽粒产量损失差异较大。与对照组 CK 相比, 当植株分别在苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期遭受干旱胁迫时, 2015 季和 2016 季的籽粒产量分别减少了 14.2% 和 28.0% (T1 和 T2 减少的平均值)、18.2% 和 30.5% (T3 和 T4 减少的平均值)、53.1% 和 56.2% (T5 和 T6 减少的平均值)、50.1% 和 45.2% (T7 和 T8 减少的平均值)(表 2)。明显地, 花荚期和鼓粒期受干旱胁迫对大豆籽粒形成的不利影响更为严重。这些结果与 DOĞAN 等<sup>[31]</sup>的研究发现一致, 即在大田环境中, 大豆鼓粒期、结荚前期和籽粒形成前期不实施灌溉的处理相比充分灌溉处理, 产量分别减少了 50%、33% 和 31%。

表 2 两季大豆不同试验处理下产量构成要素及其差异显著性分析结果(0.05 水平)

试验处理编号	收获时地上部生物量/(t/hm <sup>2</sup> )		籽粒产量/(t/hm <sup>2</sup> )		千粒重/g	
	2015 季	2016 季	2015 季	2016 季	2015 季	2016 季
CK	19.69 a	12.34 a	12.05 a	8.37 a	244.07 a	278.98 a
T1	18.47 b	12.25 a	10.80 b	6.42 b	240.83 a	240.98 b
T2	16.15 cd	8.95 b	9.88 c	5.64 c	233.66 ab	233.03 bcd
T3	16.89 c	12.33 a	10.49 b	6.89 b	234.25 ab	237.30 bc
T4	14.30 e	8.34 b	9.23 d	4.75 e	209.29 bc	212.72 d
T5	15.42 de	10.92 a	9.12 d	5.08 d	243.45 a	265.16 a
T6	9.12 h	6.62 c	2.18 g	2.25 g	170.65 c	214.50 d
T7	12.65 f	8.85 b	7.83 e	5.73 c	206.76 c	219.17 cd
T8	11.48 g	6.79 c	4.20 f	3.44 f	127.42 d	162.70 e
显著性	***	***	***	***	***	***

注: \*\*\* 表示试验处理间在 0.001 水平上差异显著, 处理字母不同表示在 0.05 水平上差异显著。

两季试验中各处理间的大豆收获时地上部生物量和千粒重也有显著差异( $p \leq 0.001$ ),且因早损失均随生育阶段内受旱胁迫程度的增加而增加。在2015季和2016季试验中,鼓粒期受旱胁迫下的收获时地上部生物量均为最低,与对照组CK相比分别减少了38.7%和36.6%(T7和T8减少的平均值)。同样,鼓粒期受旱胁迫下的千粒重在两季中也均最小,比对照组CK分别降低了31.5%和31.6%(T7和T8降低的平均值)(表2)。同样,DOGAN等<sup>[31]</sup>在大田研究中发现,与充分灌溉相比,鼓粒期不实施灌溉的大豆生物量和千粒重分别减少了33.0%和13.4%。然而,这两个减少量均低于本研究中的对应值,这可能是由于两个研究中鼓粒期受旱胁迫程度不同或大豆品种不同导致的。另外,本研究结果与DESCLAUX等<sup>[30]</sup>的盆栽试验发现一致,即当大豆在各生育阶段遭遇两个水平的干旱胁迫时(具体试验设计为在盆栽土壤含水量分别达到植株可利用水量的30%和50%之前,不进行灌溉),除鼓粒期外,均未造成明显的单粒种子重量减少。

### 3 结语

本研究以淮北平原地区两季夏大豆盆栽受旱试验为基础,分别构建了收获时大豆地上部生物量与籽粒产量之间的线性函数、受旱当期和受旱后复水各生育阶段植株蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间的线性函数并作了相应讨论分析,并对不同生育阶段受旱胁迫下大豆产量构成要素的定量响应进行了讨论分析,得到以下结论。

(1)不同受旱胁迫下大豆收获时地上部生物量与籽粒产量之间均呈显著正相关(2015季、2016季两者之间相关系数分别为0.91和0.78),籽粒产量与其各生育阶段不断积累所得的地上部总生物量存在定量转化关系,不同受旱条件下各阶段的地上部生物积累量不同,造成收获时地上部总生物量及其最终转化为的籽粒产量差异较大。

(2)大豆某一生育阶段受旱当期的地上部生长过程与该阶段的蒸腾作用密切相关,受旱越严重,蒸发蒸腾量越小,生物积累量越少,且在花荚期更为显著;花荚期受旱当期地上部生长对蒸腾作用的响应最为敏感,苗期最不敏感;花荚期是大豆生长发育的关键时期,营养生长和生殖生长并行,需水量大,有必要保证这一阶段的水分供应;大豆某一阶段受旱对后续阶段蒸发蒸腾与地上部生长过程这两者造成的影响之间具有一定的相关性,但距受旱时期越远相关性越弱;在营养生长阶段受旱后恢复充分供水,后续阶段中受损的蒸腾作用仍未恢复,而鼓粒期时植株的地上部生长机制已恢复正常,甚至出现生长补偿效应,且在前期轻度受旱后复水更为明显。

(3)大豆某一生育阶段蒸发蒸腾量与地上部生物积累量之间并不总是简单的正比例函数,它与其在该阶段当前和之前的受旱情况密切相关,需分别考虑某一阶段当前受旱和之前受旱两种情况下植株蒸发蒸腾量与生物积累量之间的定量关系。此外,大豆在某一阶段遭受干旱胁迫不仅造成该阶段蒸发蒸腾量和地上部生物积累量的损失,且会产生后效影响,使得受旱之后多个阶段的蒸发蒸腾量和地上部生物积累量相对充分灌溉也发生减少。

(4)大豆不同生育阶段受旱胁迫造成的籽粒产量损失差异较大,与充分灌溉相比,植株分别在苗期、分枝期、花荚期和鼓粒期遭受干旱时,2015和2016季的籽粒产量分别减少了14.2%和28.0%、18.2%和30.5%、53.1%和56.2%、50.1%和45.2%,花荚期和鼓粒期受旱对籽粒形成的不利影响更为严重;2015和2016季鼓粒期受旱胁迫下的收获时植株地上部生物量和千粒重均为最低,本研究为解析作物旱灾损失形成复杂机制奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] DALEZIOS N R, BLANTA A, SPYROPOULOS N, et al. Risk identification of agricultural drought for sustainable agroecosystems [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(9): 2435–2448.
- [2] 罗党,李晶. 面板数据下区域农业干旱灾害风险的灰色C型关联分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 47–53.
- [3] 金菊良,宋占智,崔毅,等. 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 398–412.
- [4] CUI Y, JIANG S M, JIN J L, et al. Quantitative assessment of soybean drought loss sensitivity at different growth stages based on S-shaped damage curve [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 821–832.
- [5] GAJICB, KRESOVICB, TAPANAROVA A, et al. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 224–231.
- [6] 汤广民,王友贞. 安徽淮北平原主要农作物的优化灌溉制度与经济灌溉定额[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2): 24–29.
- [7] 郑健,蔡焕杰,王健,等. 日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 30–34.
- [8] 韩娜娜,王仰仁,孙书洪,等. 灌水对冬小麦耗水量和产量影响的试验研究[J]. *节水灌溉*, 2010(4): 4–7.
- [9] CHENG W G, LU W X, XIN X, et al. Adaptability of various models of the water production function for rice in Jilin Province, China [J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14: 355–365.
- [10] 蒋磊,尚松浩,杨雨亭,等. 基于遥感蒸散发的区域作物估产方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 90–97.
- [11] YUE Q, ZHANG F, ZHANG C L, et al. A full fuzzy – interval credibility – constrained nonlinear programming approach for irrigation water allocation under uncertainty [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105961.
- [12] KHAKWANI A A, DENNETT M D, KHAN N U, et al. Stomatal and chlorophyll limitations of wheat cultivars subjected to water stress at booting and anthesis stages [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2013, 45: 1925–1932.
- [13] 纪瑞鹏,于文颖,冯锐,等. 作物对干旱胁迫的响应过程与早期识别技术研究进展[J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 153–160.
- [14] 马小龙,余旭,王朝辉,等. 旱地小麦产量差异与栽培、施肥及主要土壤肥力因素的关系[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(24): 4757–4771.
- [15] 郑盛华,严昌荣. 水分胁迫对玉米苗期生理和形态特性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1138–1143.
- [16] 李明达,张红萍. 水分胁迫及复水对豌豆干物质积累、根冠比及产量的影响[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 1034–1040.
- [17] JUMRANI K, BHATIA V S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2018, 24: 37–50.
- [18] WEI Y Q, JIN J L, JIANG S M, et al. Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei Plain, China [J]. *Agronomy*, 2018, 8: 97.
- [19] 高宏云,李军宏,王远远,等. 2个不同耐旱性棉花品种光合特性和干物质累积对干旱的响应[J]. *新疆农业科学*, 2020, 57(2): 233–244.
- [20] WERF W V, KEESMAN K, BURGESS P, et al. Yield – Safe: a parameter – sparse, process – based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(4): 419–433.



- [21] 苏涛, 王鹏新, 杨博, 等. 基于生物量的区域土壤水分变化量反演[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 52–58.
- [22] 魏永霞, 汝晨, 吴昱, 等. 黑土区水稻光合物质生产特性对耗水过程的响应[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 263–274, 284.
- [23] 全锦, 孙敏, 任爱霞, 等. 高产小麦品种植株干物质积累转、土壤耗水与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3467–3478.
- [24] 蔡福, 米娜, 明惠青, 等. WOFOST 模型蒸散过程改进对玉米干旱模拟影响[J]. 应用气象学报, 2021, 32(1): 52–64.
- [25] 金菊良, 杨齐祺, 周玉良, 等. 干旱分析技术的研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 1–15.
- [26] 侯志强, 蒋尚明, 金菊良, 等. 不同生育期干旱胁迫对夏大豆耗水量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 19–24.
- [27] 崔毅, 蒋尚明, 金菊良, 等. 基于水分亏缺试验的大豆旱灾损失敏感性评估[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 50–61.
- [28] CUI Y, JIANG S M, JIN J L, et al. Decision-making of irrigation scheme for soybeans in the Huaibei Plain based on grey entropy weight and grey relation – projection pursuit[J]. Entropy, 2019, 21: 877.
- [29] 袁宏伟, 杨继伟, 刘佳, 等. 干旱胁迫下不同抗旱型小麦品种生理及产量特征分析[J]. 节水灌溉, 2020(7): 9–12.
- [30] DESCLAUX D, HUYNH T – T, ROUMET P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress[J]. Crop Science, 2000, 40: 716–722.
- [31] DOGAN E, KIRNAK H, COPUR O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO – soybean simulations under semi-arid climatic conditions[J]. Field Crops Research, 2007, 103: 154–159.
- [32] SINCIK M, CANDOĞAN B N, DEMIRTAS C, et al. Deficit irrigation of soya bean [Glycine max (L.) Merr.] in a sub-humid climate[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008, 194: 200–205.
- [33] PATANÈC, COSENTINO S L. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97: 131–138.

## Study on Response Relationship between Evapotranspiration and Aboveground Growth Matter of Soybean under Different Drought Stress

CUI Yi<sup>1,2</sup>, JIN Juliang<sup>1,2</sup>, JIANG Shangming<sup>3</sup>, ZHOU Yuliang<sup>1,2</sup>,  
WU Chengguo<sup>1,2</sup> and NING Shaowei<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;  
2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Hefei 230088, China)

**Abstract:** There are a lot of uncertainties in the formation process of agricultural drought loss, while the quantitative response relationships between crop evapotranspiration and growth matter accumulation under different drought stress are the basis for analyzing the process, which has important practical significance for guiding regional drought resistance and disaster reduction. Based on the pot drought experiments of two-season summer soybean in the Huaibei Plain, the functional relationships between aboveground biomass at harvest and grain yield, and those between evapotranspiration and aboveground biomass accumulation at each growth stage of soybean during and after drought stress are established, respectively. In addition, the responses of yield components to drought stress at different stages are analyzed quantitatively. The results showed that there is a significant positive correlation between soybean aboveground biomass at harvest and grain yield (the correlation coefficients in 2015 and 2016 seasons are 0.91 and 0.78, respectively), and there is a quantitative transformation between grain yield and the total aboveground biomass accumulated during each stage. Moreover, there is a significant positive correlation between evapotranspiration and aboveground biomass accumulation at a certain stage of drought, and it is more obvious during the flowering-podding stage. In addition, drought stress at a certain stage also affects the evapotranspiration and aboveground growth during each growth stage after drought, and there is a certain correlation between these two, but the farther from the stage of drought, the weaker the correlation is. Furthermore, rewatering after drought during the vegetative growth phase, the growth mechanism of soybean returns to normal at the seed filling stage, and this recovery effect is more significant after slight drought. The grain yield losses caused by drought stress at various stages are quite different. Compared with full irrigation, the grain yield in 2015 and 2016 seasons decrease by 14.2% and 28.0%, 18.2% and 30.5%, 53.1% and 56.2%, 50.1% and 45.2%, respectively, during the seedling stage, branching stage, flowering-podding stage and seed filling stage. The adverse effects of drought on grain formation at the flowering-podding stage and seed filling stage are more serious. Moreover, the aboveground biomass at harvest and 1000 grain weight are both the lowest under drought stress at the seed filling stage in the two seasons.

**Key words:** crop response to drought; evapotranspiration; growth matter accumulation; pot experiment; summer soybean; Huaibei Plain