

## 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

侯志强<sup>1,2</sup>, 蒋尚明<sup>3</sup>, 金菊良<sup>1,2\*</sup>, 袁宏伟<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学  
水资源与环境系统工程研究所, 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 蚌埠 233000)

**摘要:**【目的】降低大豆旱灾减产风险。【方法】基于2015年和2016年夏大豆受旱盆栽试验,以生育期不同土壤水分  
为控制因素,在大豆苗期、分枝期、花荚期、鼓粒成熟期分别设置轻旱和重旱2个水平,以全生育期不早为对照  
(CK),共9个水分处理,分析了大豆不同生育期不同干旱胁迫程度下的耗水规律及其对产量和水分利用效率(WUE)  
的影响。【结果】干旱胁迫使得生育期耗水量减少,且干旱程度越重减少比例越大,以2015年为例,与CK相比,大豆  
苗期、分枝期、花荚期和鼓粒成熟期轻旱处理耗水量分别减少35.60%、34.89%、35.39%、38.35%,重旱处理则分别减  
少62.01%、69.19%、57.83%、83.50%;各生育期不早和轻旱处理下日耗水强度均值表现为花荚期>鼓粒成熟期>分枝  
期>苗期,而重旱处理下鼓粒成熟期日耗水强度最小;各生育期干旱胁迫造成大豆产量损失均值表现为花荚期>鼓  
粒成熟期>分枝期>苗期;以2016年为例,4个生育期重旱处理WUE比较旱处理分别低4.74%、13.01%、35.90%、  
18.46%,说明各生育期干旱程度越严重则WUE越低,不同生育期干旱对WUE的影响程度不同,苗期和分枝期影响  
较小,花荚期重旱处理时WUE最低。【结论】大豆不同生育期干旱胁迫对耗水量和WUE的影响较为明显,花荚期和  
鼓粒成熟期是大豆产量形成的关键需水期,实际生产中,应充分保证花荚期和鼓粒成熟期的水分供应,同时在保证  
产量的前提下,可在苗期和分枝期适度受旱。

**关键词:**耗水量; 产量; 水分利用效率; 干旱胁迫; 夏大豆; 淮北平原

中图分类号:S274.1

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0399

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.

### 0 引言

夏大豆生长发育期内耗水量大且对水分反应敏感,干旱胁迫会破坏植株体内正常的新陈代谢,不利于蛋白质的合成,降低酶活性,并影响碳氮代谢等,因此科学合理的水分管理对提高大豆产量和品质十分关键<sup>[1-2]</sup>。精确控制土壤水分是研究干旱胁迫对作物生长发育的影响的基础,前人<sup>[3-5]</sup>分别研究了不同灌溉制度下不同作物(冬小麦、黄瓜、番茄等)的耗水规律、产量与水分的关系,为建立最优灌溉制度提供了理论依据。王海霞等<sup>[6]</sup>研究了不同灌溉制度对不同品种的冬小麦产量和水分利用效率的影响。闫春娟等<sup>[7]</sup>对不同生育期干旱胁迫对大豆根系和产量的影响进行了研究。申孝军等<sup>[8]</sup>探讨了水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响。刘梅先等<sup>[9]</sup>、刘浩等<sup>[10]</sup>认为不同时期不同程度的水分胁迫均会影响棉花的生长和产量以及品质的形成。上述研究虽对作物耗水规律进行分析,但试验数据多以1a为基础,忽视气候变化对其影响。虽然对多种作物水分调控已有大量研究报道,但不同地区的气候条件和作物品种对干旱胁迫的反应不同,而对淮北平原半湿润地区大豆不同生育期干旱胁迫响应分析的研究鲜有报道。因此,有必要对淮北平原大豆耗水规律和不同干旱胁迫程度对大豆产量和水分利用效率的影响进行研究。于2015年和2016年在安徽省水利科学研究院新马桥农水综合试验站开展夏大豆盆栽干旱试验,对淮北平原夏大豆不同生育期不同干旱胁迫程度下的耗水规律、产量和WUE的影响进行分析,以期降低大豆旱灾减产风险和优化灌溉制度提

收稿日期:2017-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51409002,51579059,51579060)

作者简介:侯志强(1992-),男,硕士研究生,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: h334970026@163.com

通信作者:金菊良(1966-),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: JINJL66@126.com

供一定参考。

## 1 试验与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2015年和2016年在安徽省水利科学研究院新马桥农水综合试验站进行,该站位于淮北平原中南部(117°22'E,33°09'N,海拔19.7 m),该地区属于半湿润气候,多年平均降水量为917 mm,降水多集中于6—9月,约占全年降水量的60%,多以暴雨形式降落,降水分布不均、极易形成农作物旱涝灾害,多年平均气温15.0℃。试验区土壤为淮北平原典型的砂浆黑土,土壤体积质量为1.36 g/cm<sup>3</sup>,表层土壤中0~50 cm砂粒质量分数为12.4%、黏粒质量分数为19.1%。田间质量持水率为38.1%,凋萎质量含水率为12.2%,试验站内设有自动气象站,可获得逐日气象数据,2015年和2016年气象数据见表1。

表1 2015年和2016年气象资料

年份	苗期		分枝期		花荚期		鼓粒成熟期	
	日最高气温 平均值/℃	日照 时间/h	日最高气温 平均值/℃	日照 时间/h	日最高气温 平均值/℃	日照 时间/h	日最高气温 平均值/℃	日照 时间/h
2015	30.9	30.3	32.2	71.8	31.5	89.7	28.9	224.9
2016	34.2	82.6	33.4	103.8	32.6	154.4	30.7	177.2

### 1.2 试验设计

供试大豆品种为中黄13号,盆栽土壤来自于试验站大田0~20 cm土层,晒干过筛去除杂草与石块,每盆栽土17 kg,每盆保苗3株。结合大豆生长发育特征将全生育期划分为苗期、分枝期、花荚期和鼓粒成熟期,2 a大豆各生育阶段起止日期及时间如表2所示。

表2 2015年和2016年盆栽大豆各生育阶段起止日期及时间

年份	苗期		分枝期		花荚期		鼓粒成熟期	
	日期	时间/d	日期	时间/d	日期	时间/d	日期	时间/d
2015	0704—0714	11	0715—0803	20	0804—0820	17	0821—0920	31
2016	0716—0727	12	0728—0810	14	0811—0831	21	0901—0926	26

以生育期不同土壤水分为控制因素,在大豆苗期、分枝期、花荚期、鼓粒成熟期分别设置轻旱和重旱2种干旱胁迫水平,全生育期不早处理为对照(CK),共9个水分处理。对应的土壤含水率(土壤含水率占田间持水率的百分比)下限分别为75%、55%、35%,上限为90%<sup>[11-12]</sup>,每个处理5次重复。盆栽塑料桶上口直径28 cm,下底直径20 cm,桶高27 cm,置于自动防雨棚中,土壤含水率完全人工控制,具体试验方案见表3。每个处理除不同水分处理外,其他管理方式完全一致,盆栽管理保证大豆正常生长发育,没有病虫害影响。

表3 试验设计方案

处理	各生育阶段土壤含水率下限/%				备注
	苗期	分枝期	花荚期	鼓粒成熟期	
T1	55	75	75	75	苗期轻旱
T2	35	75	75	75	苗期重旱
T3	75	55	75	75	分枝期轻旱
T4	75	35	75	75	分枝期重旱
T5	75	75	55	75	花荚期轻旱
T6	75	75	35	75	花荚期重旱
T7	75	75	75	55	鼓粒成熟期轻旱
T8	75	75	75	35	鼓粒成熟期重旱
CK	75	75	75	75	全生育期不早

### 1.3 试验测定项目及方法

1)土壤含水率。大豆各盆栽土壤含水率由每天称取盆栽质量计算得到,本试验中当天初始土壤含水率以前1天傍晚称取盆栽质量时的土壤含水率加上当天灌水量计算得到,当天傍晚称取盆栽质量时土壤含水率作为当天末尾含水率。

2)灌水量。若当天计算得到的末尾土壤含水率小于表3中不同处理不同生育期对应的土壤含水率下限时,则第2天07:00浇水,使用量杯精确量测,使土壤含水率达到田间持水率的90%。

3)作物耗水量。本试验通过测定土壤含水率来计算作物耗水量,计算式为<sup>[8]</sup>:

$$ET_{c,i} = 10\gamma H(W_{i,初} - W_{i,末}) + I_i + P + K + C, \quad (1)$$

式中： $ET_{ci}$ 为第*i*天大豆实际耗水量(mm)； $W_{i初}$ 为盆栽第*i*天的初始土壤含水率； $W_{i末}$ 为盆栽第*i*天的末尾土壤含水率； $\gamma$ 为土壤体积质量( $g/cm^3$ )； $H$ 为土壤厚度(cm)； $L_i$ 为大豆盆栽第*i*天灌水量(mm)； $P$ 为时段内的降水量(mm)； $K$ 为时段内的地下水补给量(mm)； $C$ 为时段内的排水量(mm)；本试验中 $P$ 、 $K$ 、 $C$ 均为0。

4)水分利用效率( $WUE$ )( $g/mm$ )=单个盆栽大豆籽粒产量/该盆栽全生育期总耗水量。

5)采用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据计算和作图,用 SPSS 22.0 统计分析软件进行数据差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生育期干旱胁迫程度对大豆耗水量的影响

2015年和2016年夏大豆不同生育期干旱胁迫下的耗水量如图1(a)所示。由图1(a)可知,大豆各生育期不同干旱胁迫程度下耗水量相差较大,CK生育期总耗水量最大,其次是轻旱处理,重旱处理耗水量最小。以2015年为例,与CK相比,大豆苗期、分枝期、花荚期和鼓粒成熟期轻旱处理耗水量分别减少35.60%、34.89%、35.39%、38.35%;重旱处理耗水量分别减少62.01%、69.19%、57.83%、83.50%。由此可见,各生育期干旱胁迫会造成该生育期总耗水量减少,且干旱程度越重减少比例越大,这与时学双等<sup>[13]</sup>、石小虎等<sup>[14]</sup>对非充分灌溉条件下春青稞和番茄的耗水规律研究结果一致。2 a相同生育期的大豆耗水量存在差异,如2016年CK花荚期耗水量比2015年大23.82%,这与2 a大豆播种日期、生育期长短不同和气候差异有关。

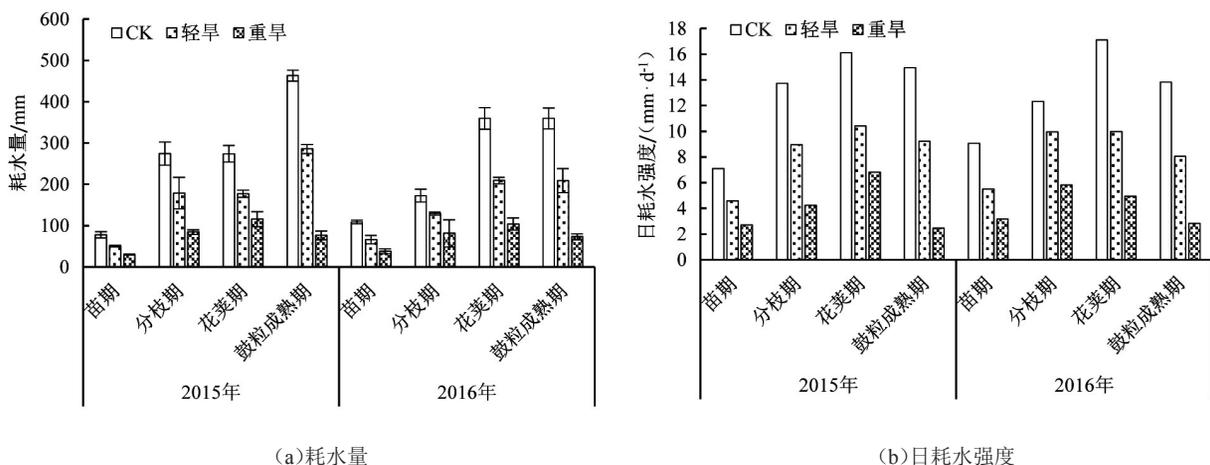


图1 2015年和2016年大豆不同生育期干旱胁迫下的耗水量及日耗水强度

大豆不同生育期干旱胁迫下日耗水强度如图1(b)所示。由图1(b)可知,各生育期不同干旱胁迫下日耗水强度存在较大差异,CK日耗水强度最大,其次是轻旱,重旱最小,这与各生育期不同干旱胁迫下耗水量情况吻合。不同生育期同一干旱胁迫下日耗水强度也存在差异:CK和轻旱处理不同生育期日耗水强度均值表现为花荚期>鼓粒成熟期>分枝期>苗期,这与严菊芳等<sup>[15]</sup>的研究结论相一致。以CK为例,2015年盆栽大豆4个生育期日均耗水强度分别为:苗期为7.10 mm/d,分枝期为13.72 mm/d,花荚期为16.11 mm/d,鼓粒成熟期为14.94 mm/d。2016年盆栽大豆4个生育期日均耗水量分别为:苗期为9.06 mm/d,分枝期为12.33 mm/d,花荚期为17.12 mm/d,鼓粒成熟期为13.83 mm/d。大豆各生育期日耗水强度大小符合其实际生长发育过程,大豆苗期是长根期,此时耗水量小且以土壤蒸发为主;分枝期大豆处于营养生长关键期,大豆主茎下部开始出现分枝,耗水量进一步增加;花荚期是大豆生长发育最旺盛的阶段,大豆处于营养生长和生殖生长并进时期,此时作物蒸腾强度大,需要大量的水分通过植物蒸腾作用进行运输、传递;鼓粒成熟期时大豆处于生殖生长时期,叶片开始衰老变黄凋落,作物蒸腾强度逐渐减小,对水分的需求也逐渐减小。

各生育期重旱处理鼓粒成熟期日耗水强度最小,这与CK和轻旱处理存在差异。鼓粒成熟期重旱处理植株叶片相比CK和轻旱处理提前变黄脱落,豆类提前鼓粒变干,因此鼓粒成熟期降低土壤水分会促使大豆提前成熟,也会造成大豆耗水强度进一步减少。

### 2.2 不同生育期干旱胁迫程度对大豆产量的影响

2015年和2016年9个处理的产量如表4所示。由表4可知,2 a产量均为CK最大,花荚期重旱(T6处理)最小,2016年产量比2015年产量整体偏低,这与2 a气候不同有较大关系(见表1)。王革丽等<sup>[16]</sup>认为大豆适

宜生长在短日照、恒温、降水量充足的地区,大豆不耐高温和低温,温度过高或过低都会对产量不利。2016年大豆全生育期日最高气温平均值为32℃,比2015年高2℃;2016年大豆全生育期日照总时间为518h,比2015年多19.5%,同时从试验站大田种的大豆产量也偏低可得到验证,这与康桂红等<sup>[17]</sup>研究结论相一致。各生育期受旱程度不同对产量的影响不同,干旱程度越严重产量减少幅度越大,且不同生育期同一干旱程度对大豆产量影响也不同,2015年苗期、分枝期、花荚期和鼓粒成熟期轻旱处理产量相比CK分别减少10.36%、12.98%、24.35%、35.05%,重旱处理产量分别减少18.04%、28.53%、81.90%、65.18%;2016年苗期、分枝期、花荚期、鼓粒成熟期轻旱处理产量相比CK分别减少20.95%、22.10%、39.33%、27.85%,重旱处理产量分别减少32.65%、38.51%、73.07%、52.49%。由此可知,苗期和分枝期受旱减产少,主要是因为苗期和分枝期处于长根期,在适当干旱胁迫下,大豆为了获得自身营养生长足够的水分,其根系会向更深处有水的地方延伸且侧根发达,这是作物自身的适应过程<sup>[22-23]</sup>,可提高其后期抗旱能力,而大豆花荚期和鼓粒成熟期不论受轻旱还是重旱,其产量损失明显大于苗期和分枝期,说明大豆花荚期和鼓粒成熟期是大豆产量形成的关键需水期,实际生产活动中,应充分保证花荚期和鼓粒成熟期的水分供应。结合2a试验减产数据,可发现大豆不同生育期受旱减产损失均值表现为花荚期>鼓粒成熟期>分枝期>苗期,这与韩晓增等<sup>[18]</sup>研究结论基本吻合。

表4 2015年和2016年不同生育期干旱胁迫下大豆耗水量及产量

年份	处理	耗水量/mm				全生育期总耗水	产量/g
		苗期	分枝期	花荚期	鼓粒成熟期		
2015	T1	50.31±1.81 <sup>c</sup>	233.73±29.04 <sup>b</sup>	237.78±14.02 <sup>b</sup>	434.82±10.36 <sup>b</sup>	956.65±61.94 <sup>bc</sup>	66.52±2.76 <sup>b</sup>
	T2	29.68±1.06 <sup>d</sup>	234.78±15.55 <sup>b</sup>	252.54±16.86 <sup>b</sup>	457.85±6.26 <sup>a</sup>	974.85±23.62 <sup>b</sup>	60.82±0.88 <sup>c</sup>
	T3	77.62±2.71 <sup>a</sup>	178.7±38.08 <sup>c</sup>	212.94±8.54 <sup>c</sup>	435.76±15.57 <sup>b</sup>	905.03±52.27 <sup>c</sup>	64.57±1.95 <sup>bc</sup>
	T4	76.02±4.32 <sup>a</sup>	84.56±5.71 <sup>d</sup>	196.69±1.68 <sup>c</sup>	448.65±23.07 <sup>ab</sup>	805.92±29.19 <sup>c</sup>	53.04±1.65 <sup>d</sup>
	T5	69.50±8.13 <sup>b</sup>	256.63±17.69 <sup>ab</sup>	206.97±8.67 <sup>c</sup>	430.69±8.70 <sup>b</sup>	963.79±23.58 <sup>bc</sup>	56.14±3.16 <sup>d</sup>
	T6	73.51±3.69 <sup>ab</sup>	252.54±16.99 <sup>ab</sup>	165.5±18.03 <sup>d</sup>	190.51±14.59 <sup>d</sup>	682.07±18.71 <sup>c</sup>	13.43±3.60 <sup>f</sup>
	T7	69.51±8.27 <sup>b</sup>	241.45±11.90 <sup>b</sup>	255.07±9.84 <sup>ab</sup>	285.58±11.14 <sup>c</sup>	851.61±12.01 <sup>c</sup>	48.19±2.93 <sup>c</sup>
	T8	73.64±4.41 <sup>ab</sup>	257.71±16.59 <sup>ab</sup>	251.46±16.49 <sup>b</sup>	76.41±10.34 <sup>c</sup>	659.23±33.88 <sup>c</sup>	25.84±1.61 <sup>e</sup>
	CK	78.13±7.6 <sup>a</sup>	274.46±27.77 <sup>a</sup>	273.88±20.12 <sup>a</sup>	463.21±13.17 <sup>a</sup>	1089.68±56.13 <sup>a</sup>	74.2±2.35 <sup>a</sup>
2016	T1	65.92±10.36 <sup>c</sup>	136.65±14.61 <sup>b</sup>	299.75±18.13 <sup>bc</sup>	321.77±21.46 <sup>b</sup>	824.09±57.75 <sup>b</sup>	48.43±3.12 <sup>b</sup>
	T2	37.92±5.91 <sup>d</sup>	134.93±17.43 <sup>b</sup>	274.53±14.43 <sup>c</sup>	311.03±10.08 <sup>b</sup>	758.42±32.83 <sup>c</sup>	42.54±2.91 <sup>c</sup>
	T3	113.87±8.02 <sup>ab</sup>	139.05±3.69 <sup>b</sup>	276.85±15.72 <sup>c</sup>	314.58±18.60 <sup>b</sup>	844.35±19.47 <sup>b</sup>	49.21±4.75 <sup>bc</sup>
	T4	115.81±8.32 <sup>a</sup>	81.28±32.79 <sup>c</sup>	214.93±39.46 <sup>d</sup>	353.74±28.06 <sup>ab</sup>	765.76±31.10 <sup>c</sup>	38.85±0.64 <sup>d</sup>
	T5	112.27±4.98 <sup>ab</sup>	161.77±12.82 <sup>a</sup>	209.17±7.95 <sup>d</sup>	275.05±12.39 <sup>c</sup>	758.25±32.01 <sup>c</sup>	38.33±2.10 <sup>d</sup>
	T6	104.1±11.06 <sup>ab</sup>	166.16±18.81 <sup>a</sup>	103.59±14.74 <sup>c</sup>	159.65±47.74 <sup>c</sup>	527.50±46.38 <sup>c</sup>	17.01±3.99 <sup>f</sup>
	T7	110.97±7.60 <sup>ab</sup>	165.87±18.36 <sup>c</sup>	322.27±12.87 <sup>b</sup>	208.87±29.03 <sup>d</sup>	817.98±30.46 <sup>b</sup>	45.58±2.77 <sup>c</sup>
	T8	102.67±9.38 <sup>b</sup>	166.07±17.11 <sup>a</sup>	330.45±19.16 <sup>ab</sup>	73.23±7.23 <sup>f</sup>	658.42±42.66 <sup>d</sup>	30.02±3.85 <sup>c</sup>
	CK	108.78±4.41 <sup>ab</sup>	172.66±15.57 <sup>a</sup>	359.56±25.94 <sup>a</sup>	359.5±25.06 <sup>a</sup>	1000.49±33.02 <sup>a</sup>	63.17±3.55 <sup>a</sup>

注 表中数据为平均值±标准差;同一年份同一列中不同字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著。

### 2.3 不同生育期干旱胁迫程度对大豆水分利用效率的影响

2a大豆不同受旱胁迫处理的WUE如图2所示。由图2分析可知,各生育期同一干旱胁迫程度下苗期和分枝期的WUE比花荚期和鼓粒成熟期高,2015年苗期和分枝期轻旱(T1处理和T3处理)WUE比CK高1.87%和4.48%,而在2016年未出现相同情况,这可能与2a的气候与播种时间不同有关,现有研究对干旱胁迫是否利于提高WUE尚存有争议<sup>[19-21]</sup>。生育期不同干旱胁迫程度下WUE存在差异,干旱程度越重,WUE越低,2015年苗期重旱处理WUE比轻旱处理小10.36%,分枝期小7.90%,花荚期小66.21%,鼓粒成熟期小30.73%;2016年苗期重旱处理WUE比轻旱处理小4.74%,分枝期小13.01%,花荚期小35.90%,鼓粒成熟期小18.46%。由此可见,大豆苗期和分枝期轻旱与重旱处理WUE差别较小,而花荚期和鼓粒成熟期轻旱与重旱处理WUE差别明显,在实际生产活动中,在保证产量的前提下,可允许苗期和分枝期适度受旱。

此外,从图2中还可知,花荚期重旱(T6处理)WUE最低,苗期和分枝期轻旱处理WUE与CK基本持平,而花荚期和鼓粒成熟期干旱处理WUE与CK差异明显,2015年花荚期和鼓粒成熟期重旱处理WUE比CK分别低68.86%和42.53%,2016年花荚期和鼓粒成熟期重旱处理WUE比CK分别低49.49%和29.30%。综上所述,大豆花荚期和鼓粒成熟期干旱胁迫对水分利用效率的影响比苗期和分枝期大,尤其是花荚期重旱处理影响最大,花荚期应要注意土壤水分的及时供应。

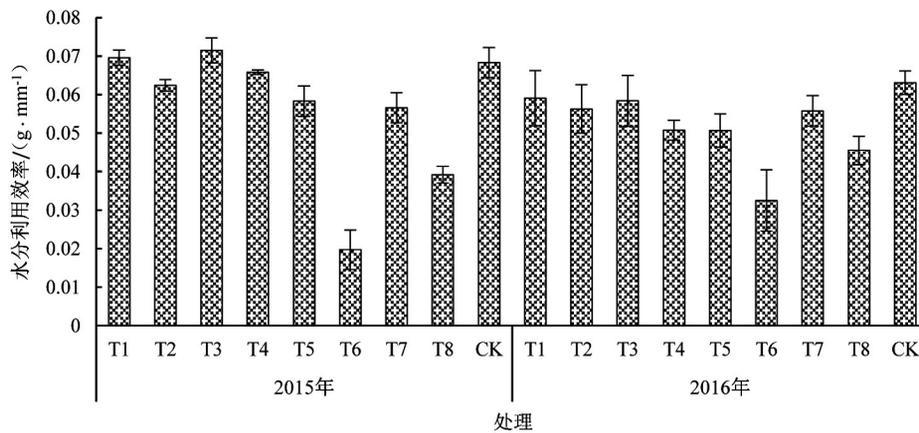


图2 2015年和2016年大豆不同生育期干旱胁迫下的水分利用效率

### 3 结论

1) 干旱胁迫使得生育期耗水量减少,且干旱程度越重减少比例越大,以2015年为例,相比CK,大豆苗期、分枝期、花荚期和鼓粒成熟期轻旱处理耗水量分别减少35.60%、34.89%、35.39%、38.35%,重旱处理耗水量分别减少62.01%、69.19%、57.83%、83.50%。各生育期不早和轻旱处理下日耗水强度均值表现为花荚期>鼓粒成熟期>分枝期>苗期。各生育期重旱处理下鼓粒成熟期日耗水强度最小,不同生育期日耗水强度均值表现为花荚期>分枝期>苗期>鼓粒成熟期。

2) 各生育期干旱胁迫对大豆产量损失的影响不同,以2015年为例,苗期、分枝期、花荚期和鼓粒成熟期轻旱处理产量相比CK分别减少10.36%、12.98%、24.35%、35.05%,重旱处理产量分别减少18.04%、28.53%、81.90%、65.18%,说明苗期和分枝期干旱对产量的影响较小,而花荚期和鼓粒成熟期不论轻旱或重旱处理对大豆产量损失都明显大于苗期和分枝期,特别是花荚期产量损失最大,在实际生产中应密切注意花荚期水分管理,尽量避免花荚期和鼓粒成熟期干旱。

3) 各生育期干旱胁迫对WUE的影响不同,苗期和分枝期影响较小,因此,在实际生产活动中,在保证产量的前提下,可在苗期和分枝期适度受旱。花荚期重旱处理影响最大,WUE最低,2015年花荚期和鼓粒成熟期重旱处理WUE比CK分别低68.86%和42.53%,2016年花荚期和鼓粒成熟期重旱处理WUE比CK分别低49.49%和29.30%。因此,在大豆生长发育过程中花荚期应尽量避免干重旱胁迫。

大豆在不同干旱条件下的耗水规律较为复杂,本文只研究了单生育期干旱胁迫下对耗水量、产量和水分利用效率的影响,今后需要对多生育期连续干旱和组合干旱进行试验和验证工作,需要着重分析大豆前期受旱、后期恢复的适应性过程。

#### 参考文献:

- [1] ASHA S, RAO K N. Effect of simulated water logging on the levels of amino acids in groundnut at the time of sowing[J]. Plant Physiology, 2002, 7(3): 288-291.
- [2] TAN Y, LIANG Z, SHAO H, et al. Effect of water deficits on the activity of anti-oxidative enzymes and osmoregulation among three different genotypes of *Radix Astragal* at seeding stage[J]. Colloids and Surfaces B, 2006, 49(1): 60-65
- [3] 刘增进, 李宝萍, 李远华, 等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 58-63.
- [4] 翟胜, 梁银丽, 王巨媛, 等. 干旱半干旱地区日光温室黄瓜水分生产函数的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 136-139.
- [5] 崔毅, 陈思, 柴瑞育, 等. 番茄产量对各生育阶段土壤水分的响应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 14-21, 104.
- [6] 王海霞, 李玉义, 任天志, 等. 不同灌溉制度对冬小麦产量与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6): 112-114.
- [7] 闫春娟, 王文斌, 涂晓杰, 等. 不同生育时期干旱胁迫对大豆根系特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(1): 59-62.
- [8] 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 等. 水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 150-160.
- [9] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 滴灌模式对棉花根系分布和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(s1): 98-105.
- [10] 刘浩, 孙景生, 张寄阳, 等. 耕作方式和水分处理对棉花生产及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 164-168.
- [11] 曹成, 汤广民. 冬小麦受旱减产规律及产量与水关系模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(8): 13-17.
- [12] 张忠学, 郭亚芬, 王柏, 等. 黑龙江省西部半干旱区大豆水分生产函数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 49-51.
- [13] 时学双, 李法虎, 闫宝莹, 等. 不同生育期水分亏缺对春青稞水分利用和产量的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 144-151, 265.
- [14] 石小虎, 蔡焕杰, 赵丽丽, 等. 基于SIMDualKc模型估算非充分灌水条件下温室番茄蒸腾量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 131-138.

- [15] 严菊芳, 杨晓光. 关中地区夏大豆蒸发蒸腾及作物系数的确定[J]. 节水灌溉, 2010, 35(3): 19-22.
- [16] 王革丽, 尤莉, 王国勤. 内蒙古大豆生长发育与气候条件的关系[J]. 内蒙古气象, 2004, 24(1): 28-30.
- [17] 康桂红, 冯云荣, 于成献. 夏大豆生长的气候条件分析[J]. 山东气象, 1999, 42(4): 22-24.
- [18] 韩晓增, 乔云发, 张秋英, 等. 不同土壤水分条件对大豆产量的影响[J]. 大豆科学, 2003, 22(4): 269-272.
- [19] FARRÉ I, FACI J M. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 383-394.
- [20] 邱新强, 路振广, 孟春红, 等. 土壤水分胁迫对夏玉米形态发育及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(4): 79-83.
- [21] 许高平, 王璞, 薛绪掌, 等. 负压控水下不同株型玉米水分利用效率和产量的盆栽试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 148-156.
- [22] LIU Z F, YAO Z J, CHENG Q Y, et al. Assessing crop water demand and deficit for the growth of spring highland barley in Tibet, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(3): 541-551.
- [23] GEERTS S, RAES D, GARCIA M, et al. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa ( *Chenopodium quinoa* Willd. ) [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 427-436.

## Impact of Water Stress Occurring at Different Growth Stages on Water Consumption and Water Use Efficiency of Summer Soybean

HOU Zhiqiang<sup>1,2</sup>, JIANG Shangming<sup>3</sup>, JIN Juliang<sup>1,2\*</sup>, YUAN Hongwei<sup>3</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, Bengbu 233000, China)

**Abstract: [Objective]** The purpose of this paper is to examine water consumption and water use efficiency of summer soybean in response to water stress occurring at different growth stages in attempts to provide guidance to ameliorate yield reduction caused by drought. **[Method]** Pot experiments were conducted in 2015 and 2016 by adjusting soil moisture content at different growth stages. We considered nine water treatments: slight and severe water stress occurring at flowering-podding stage, pod-filling stage, branching stage and seedling stage respectively; and the control was no water stress (CK). For each treatment, we measured and calculated the water consumption and water use efficiency (*WUE*). **[Result]** Water stress reduced water consumption, and the reduction increased with the stress level. Taking the experiment in 2015 as an example. Compared with the CK, a slight water stress at seedling stage, branch stage, flower-podding stage and pod-filling stage reduced water consumption by 35.60%, 34.89%, 35.39%, 38.35% respectively; while a severe water stress occurring at these stages resulted in a reduction in water consumption by 62.01%, 69.19%, 57.83% and 83.50% respectively. In all treatments, including CK, the water consumption changed with growth stage in the order flowering- podding stage>pod-filling stage>branching stage >seedling stage, and the daily water consumption at pod-filling stage was the lowest under severe drought. The average yield loss caused by drought occurring at the four stages was in the order flower-podding stage>pod-filling stage>branching stage>seedling stage. Taking the experiment in 2016 as an example; the *WUE* under a severe drought happening at seedling stage, branching stage, flower-podding stage and pod-filling stage reduced by 4.74%, 13.01%, 35.90%, and 18.46% respectively, compared to those under a slight drought, indicating that the *WUE* decreased with increasing water stress level. It was also found that the impact of drought on *WUE* depended on the stage during which the drought occurred, and the impact of drought at seedling and branching stages was less significant than drought occurring at flowering-podding stage. **[Conclusion]** The effect of water stress occurring at different growth stages has noticeable impact on water consumption and *WUE* of the summer soybean. Flower-podding and pod-filling stages are critical stages in terms of water demand, and keeping sufficient water supply at these two stages is thus essential to ensure yield. Meanwhile, imposing an appropriate water stress at seedling and branching stages do not give rise to yield reduction and can be used as water-saving technique.

**Key words:** water consumption; yield; water use efficiency; drought stress; summer soybean; Huaibei plain

责任编辑:陆红飞