

基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性定量评估研究

蒋尚明¹,袁宏伟¹,崔 毅²,金菊良^{3,4},张宇亮⁵,周玉良^{3,4}

(1. 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 230088; 2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 3. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 4. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009; 5. 河海大学 水问题研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要:针对大豆旱灾系统敏感性定量评估的复杂性与重要性,依托新马桥农水综合试验站开展大豆防雨棚盆栽受旱胁迫专项试验,分析了大豆不同生育期受旱胁迫对根(冠)干物质积累及根冠比的影响,运用作物生长解析法构建了基于相对生长率(RGR)的大豆旱灾系统敏感性函数,实现对大豆旱灾系统敏感性的定量评估。结果表明:大豆苗期受旱胁迫会出现相对生长率较大幅度的降低,但随着受旱胁迫度的增大对大豆生长和干物质积累的抑制作用增强不明显,且受旱胁迫会激发自身适应受旱胁迫的机制而可能对后期生长发育有利,宜根据时机控制该生育期水分供给,保证苗全即可;大豆分枝期旱灾系统敏感性较强,但该生育期内轻度受旱胁迫对大豆生长发育影响不明显,宜保证该生育期水分供给高于轻度受旱胁迫(土壤含水率>田间持水含水率的55%),以保障大豆株壮、枝多;大豆花荚期是水分和养分需求最大的时期,该生育期旱灾系统较敏感,特别是重度受旱胁迫时系统敏感性最大,宜充分保证该生育期的水分供给(土壤含水率>田间持水含水率的75%),以保障大豆花多、荚多、粒多;大豆鼓粒成熟期由于营养生长基本停止、干物质积累几乎停滞,导致基于总干物质相对生长率旱灾系统敏感性最小,但该期是产量形成的关键期,宜保证该生育期尤其鼓粒期的水分供给(土壤含水率>田间持水含水率的75%),以保障完熟期粒多、粒重。
关键词:旱灾系统敏感性;生长解析法;相对生长率;受旱胁迫度;大豆受旱试验
中图分类号:S565.1;S274.3 **文献标识码:**A **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2018.01.0092

Quantitative Evaluation of Soybean Drought System Sensitivity based on Relative Growth Rate

JIANG Shang-ming¹, YUAN Hong-wei¹, CUI Yi², JIN Ju-liang^{3,4}, ZHANG Yu-liang⁵, ZHOU Yu-liang^{3,4}
(1. 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; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 5. Research Institute of Water Problems, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In allusion to the complexity and importance of quantitative evaluation for soybean drought system sensitivity, relying on agricultural water comprehensive test station of Xinmaqiao to carry out special soybean potted drought stress tests with anti canopy. Analysis of drought stress of soybean at different growth stages on dry matter accumulation of root and shoot and root-shoot ratio. The sensitivity function of soybean drought system based on relative growth rate (RGR) was constructed by crop growth analysis method. And then to achieve a quantitative assessment of the sensitivity of soybean drought system. The results indicate that soybean seedlings under drought stress will be a relatively large growth rate of the reduction. But with the increase of drought stress, the inhibition of soybean growth and dry matter accumulation was not obvious. And drought stress can stimulate itself to adapt to the mechanism of drought stress beneficial to the late growth and development. Appropriate control of water supply at seedling stage to ensure that all seedlings. Soybean drought system is more sensitive in branching period. But the growth period of mild drought stress on soybean growth effect is not obvious. It is necessary to ensure that the water supply during branching period is higher than the mild drought stress, then the soil moisture can content more than 55% of field capacity moisture content to protect soybeans thrive. Soybean flowering-podding period requires the most in water and nutrient, the drought system sensitivity of this growth period is also relatively large, especially when serious drought stress system sensitivity is the largest. It is necessary to fully guarantee the water supply during flowering-podding period that the soil moisture content more than 75% field capacity moisture content. Because the vegetative growth and the accumulation of dry matter are almost stagnant in soybean mature period, the drought system sensitivity is minimal that base on the relative growth rate of total dry matter. But soybean mature period is the critical period of soybean yield formation, it is necessary to fully guarantee the water supply during soybean mature period that the soil moisture content more than 75% of field capacity moisture content.
Keywords: Drought system sensitivity; Growth analysis method; Relative growth rate; Degree of drought stress; Soybean drought test

从灾害系统论和旱灾风险的物理成因出发,旱灾风险系统是孕灾环境变动性、致灾因子危险性、承灾体暴露性、敏感性和防灾减灾能力这 5 个要素相互联系、相互作用下形成的复杂系统^[1-3]。旱灾系统敏感性是指旱灾系统对致灾因子强度的响应程度或敏感程度,它与暴露性、适应性(防灾减灾能力)共同综合反映了承灾体在旱灾风险发生中的作用,这 3 个特性统称为旱灾系统脆弱性,是旱灾风险产生的必要条件,也是旱灾系统由于旱演变成为旱灾损失的中间转换环节^[2-5]。现有旱灾系统脆弱性相关研究方法主要有:(1)基于灾情数据驱动的统计分析方法^[1,6];(2)基于指标驱动的系统综合评价方法^[7-8];(3)基于“作物-水模型”和“作物生长模型”的模拟方法^[9-12]。目前旱灾系统敏感性、暴露性、适应性及脆弱性的概念与定义尚没有统一,现有成果多从统计分析或软件模型的角度研究干旱与产量之间的关系,大多没有反映致灾因子与承灾体相作用的物理机制,不能定量区分旱灾系统敏感性、暴露性与适应性(防灾减灾能力),具有指导实际防灾减灾意义的研究较少。因此,从旱灾致灾因子与承灾体相作用的物理机制出发,明确旱灾系统敏感性、暴露性、适应性及脆弱性等的物理含义,构建相应定量评估方法体系显得尤为迫切。作物产量的形成是一个复杂的生理过程,涉及光合作用、干物质积累与分配、器官的生长发育、有机无机元素的吸收、利用及转移等一系列过程^[13],这些过程遍及作物生长的各生育期,与作物的遗传特性、气象因素、土壤水分和栽培措施等密切相关,干物质积累对作物产量有着重要作用^[14-15]。大豆是中国重要的经济作物,是豆类作物中对水分最敏感的物种,水分是影响大豆干物质积累与产量的主要因素之一^[16-17]。水分亏缺^[18]、灌溉水平^[16]、干旱胁迫^[19-20]及水肥调控^[21-22]等作用下大豆干物质积累及产量的影响得到国内外学者广泛关注,但较少涉及大豆干旱胁迫或水分亏缺下的敏感性分析^[23],而从灾害系统论出发的干旱胁迫下大豆系统敏感性定量评估成果并不多见。为定量分析作物不同生长阶段的生育特性及其与环境条件的关系,英国学者 Blachman 于 1919 年提出了作物生长解析法^[24],该法认为体现作物生长的最基本特征是作物干物质质量的生长,可通过研究作物干物质的增长规律来剖析作物的生育特征及其与环境条件的关系^[24-25],后经学者不断补充完善,现已成为世界公认的一种能对作物生长进行定量研究的方法^[25-26]。基于此,本文以淮北平原主要经济作物大豆为研究对象,设置大豆各生育期不同程度受旱的试验方案,依托安徽省水利部淮河水利委员会水利科学研究院新马桥农水综合灌溉试验站,开展大豆不同生育期不同

受旱胁迫程度下的防雨棚盆栽试验,运用作物生长解析法中应用最为广泛的作物生长函数相对生长率(relative growth rate, RGR)来解析大豆不同生育期不同受旱胁迫程度下的生长发育特征,构建基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性曲线,定量评估大豆不同生育时期的旱灾系统敏感性,为区域农业旱灾风险定量评估与风险管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料与种植

大豆受旱胁迫专项试验于 2015 年 6-9 月在新马桥农水综合试验站进行,该站位于淮北平原中南部,海拔 19.7 m (N33°09', E117°22'),属半干旱半湿润季风气候区,多年平均降雨量 917 mm,6-9 月的降雨量约占全年总雨量的 60%~70%,蒸发量 916 mm,地下水埋深在 1.0~3.0 m 变动,多年平均气温 15.0℃。试验区土壤为淮北平原典型的砂姜黑土,该土质地粘重,结构不良,土体坚实,裂隙发育,土壤保水性能差,易干旱。盆栽塑料桶上部内径 28 cm,底部内径 20 cm,高 27 cm,供试土壤取自试验站内大田表层 0~20 cm,土壤容重 $1.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水含水率 28% (质量含水率),凋萎含水率 12% (质量含水率),每桶装干土重 15 kg。所有供试测桶均布置于大型启闭式防雨棚内,试验全过程隔绝降雨,土壤含水率完全受人工灌水控制。播种前每桶施史丹利复合肥(总养分 $\geq 45\%$, N-P₂O₅-K₂O, 15-15-15) 4.0 g,大豆生长期不再追施其它肥料。供试大豆品种为中黄 13,每桶定苗 3 株,于 2015 年 6 月 20 日播种,于 2015 年 9 月 20 日收获。

1.2 试验设计

试验控制因素为不同生育期土壤含水率,通过控制各生育期土壤含水率下限设置不同受旱胁迫处理。4 个生育期均设置轻度、重度两个受旱胁迫水平,根据已有成果^[27-28]和新马桥农水综合试验站多年作物受旱胁迫试验经验,确定对应的土壤含水率下限分别为 55% 和 35% (土壤含水率占田间持水含水率的百分比),共设置 8 个处理,当处理中受旱胁迫生育期结束和最终收获时均进行破坏试验,既将植株及土柱从盆中取出放入水池中浸泡,直至土壤变松散,然后用水冲洗根系,最后从水中取出完全的植株,据此测定根冠生物量,每个处理每次破坏 5 桶;另设全生育期无受旱胁迫的对照处理,其对应的土壤含水率下限为田间持水含水率的 75%,对照处理每生育期结束后均进行破坏试验,每次破坏 5 桶,具体试验设计方案见表 1。为更接近实际灌溉情况,同时结合相关控制灌溉研究的试验设计^[28],

设定灌水方式如下:当大豆盆栽土壤含水率小于或等于相应处理(表1)土壤含水率控制下限后,立即灌水至田间持水率的90%,然后保持不灌至土壤含水率再次小于或等于相应处理含水率控制下限后,

再灌水至田间持水率的90%,如此循环至相应生育期结束,下一生育期按相同灌溉方式循环。各处理除土壤含水率控制外,其它管理方式完全一致,保证大豆正常生长发育,无病虫害影响。

表1 大豆盆栽受旱胁迫试验设计方案
Table 1 Soybean pot design scheme of drought-stress test

处理 Treatment	各生育期土壤含水率控制下限 Control limit of soil moisture content at different growth stages					备注 Remark
	苗期 Seedling stage	分枝期 Branch period	花荚期 Flowering-podding	鼓粒成熟期 Mature period	重复数 Repetition	
	/%	/%	period/%	/%	number	
A-1	55	75	75	75	10	苗期轻度受旱胁迫
A-2	35	75	75	75	10	苗期重度受旱胁迫
B-1	75	55	75	75	10	分枝期轻度受旱胁迫
B-2	75	35	75	75	10	分枝期重度受旱胁迫
C-1	75	75	55	75	10	花荚期轻度受旱胁迫
C-2	75	75	35	75	10	花荚期重度受旱胁迫
D-1	75	75	75	55	5	鼓粒成熟期轻度受旱胁迫
D-2	75	75	75	35	5	鼓粒成熟期重度受旱胁迫
CK	75	75	75	75	20	对照,全生育期无水胁迫

表中土壤含水量下限为土壤含水量占田间持水量的百分比。
Control limit of soil moisture content at different growth stages is the percentage of water holding capacity in the field.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 盆栽称重、灌水与土壤含水率计算 每天18:00 用电子称(型号 YP30KN)对各处理重复盆栽样本进行称重,据此计算各处理重复盆栽样本的土壤含水率,将其与表1中各处理对应的土壤含水率下限进行比较,判定盆栽样本是否需要灌水,如需灌水则计算盆栽样本称重时土壤含水率至田间持水含水率的90%所需灌水量,并于早晨7:00 用量杯精确量测灌水。由于盆栽土壤含水率是一动态变化过程,本文以盆栽样本前1天傍晚称重时的土壤含水率加上当天早晨的灌水量为当天初始土壤含水率,当天傍晚称重时的土壤含水率盆栽当天末尾土壤含水率,盆栽当天初始和末尾土壤含水率的均值为当天平均土壤含水率,具体如下:

$$\theta'_{i,j} = \frac{W_{i-1,j} - Ws_j - Wb_j + M_{i,j}}{Ws_j} \quad (1)$$

$$\theta''_{i,j} = \frac{W_{i,j} - Ws_j - Wb_j}{Ws_j} \quad (2)$$

$$\theta_{i,j} = \frac{\theta'_{i,j} + \theta''_{i,j}}{2} \quad (3)$$

式中, $\theta'_{i,j}$ 为盆栽j第i天初始土壤含水率; $W_{i-1,j}$ 为盆栽j第i-1天傍晚的称重量,g; Ws_j 为盆栽j的干土重量,g; Wb_j 为盆栽j的桶重,g; $M_{i,j}$ 为盆栽j第i天的灌水量,g; $\theta''_{i,j}$ 为盆栽j第i天末尾土壤含水率; $W_{i,j}$ 为盆栽j第i天傍晚的称重量,g; $\theta_{i,j}$ 为盆栽j第i天的平均土壤含水率。

1.3.2 根、冠生物量的测定 需要进行破坏试验的生育期结束后,将需要破坏的盆栽整体放入水池中浸泡,直至土壤变松散,然后用水冲洗根系,最后

从水中取出完全的植株。将根和冠从茎基部分开,分别洗净后用吸水纸擦干,置于烘箱中105℃杀青30 min,然后降温至75℃恒温烘至质量恒定,再放入干燥器中冷却,之后用万分之一电子天平称(型号 JH502)重量,即可得各破坏盆栽的根、冠干物质量。

2 基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性定量评估模型构建

2.1 基于土壤含水率的作物受旱胁迫度

农作物的水分供给主要依靠根系从土壤中吸取,土壤水是土壤-植物-大气连续系统(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)的一个重要过程,当土壤含水率过低时,作物根系吸水困难,阻碍作物的正常生长及其产量形成而呈现旱象^[29-30]。土壤含水率指标可以利用农田水量平衡关系,方便地建立起SPAC系统中土壤、植物和大气三者之间的水分交换关系^[31],因此,在农业旱情评估与预报中得到广泛应用,常用的土壤含水率指标主要有土壤相对湿度指标和土壤有效水分存储量指标^[29-30]。目前已有的土壤含水率指标大多只能静态地判定当前土壤含水率下作物是否受旱,而不能表达累积受旱程度。而事实上,由于在降雨和农业灌溉作用下,农作物土壤含水率是一个上下波动的动态过程,如何定量描述土壤含水率动态变化过程下作物的累积受旱程度显得尤为迫切。

根据新马桥农水综合灌溉试验站多年作物灌溉试验成果,淮北平原旱作物水分胁迫与土壤含水率之间存在如下关系:(1)当土壤含水率大于田间持水含水率时,作物受涝、渍胁迫;(2)当土壤含水

率大于适宜土壤含水率下限而小于田间持水含水率时,作物不受水分胁迫;(3)当土壤含水率小于适宜土壤含水率下限时,作物受旱胁迫;(4)当土壤含水率小于凋萎含水率时,作物缺水萎蔫。由此,基于土壤含水率的旱作物受旱胁迫度可定义为:

$$DS_{i,j} = \begin{cases} 0 & \theta_s \leq \theta_{i,j} \leq \theta_f \\ \frac{\theta_s - \theta_{i,j}}{\theta_s - \theta_w} & \theta_w < \theta_{i,j} < \theta_s \\ 1 & \theta_{i,j} \leq \theta_w \end{cases} \quad (4)$$

式中, $DS_{i,j}$ 为盆栽 j 第 i 天的受旱胁迫度; $\theta_{i,j}$ 为盆栽 j 第 i 天的平均土壤含水率; θ_s 为作物适宜土壤含水率下限; θ_f 为田间持水含水率; θ_w 为凋萎含水率。

为求取生育期或时段内的累积受旱胁迫程度或平均受旱胁迫度,对由式(4)计算的生育期或时段内逐日受旱胁迫度求和或求平均即可:

$$SD_j = \sum_{i=t_0}^{t_1} \theta_{i,j} \quad (5)$$

$$\overline{SD_j} = \frac{\sum_{i=t_0}^{t_1} \theta_{i,j}}{t_1 - t_0} \quad (6)$$

式中, t_0 为计算生育期或时段初始时间,d; t_1 为计算生育期或时段的结束时间,d; SD_j 为盆栽 j 计算生育期或时段内的累积受旱胁迫度; $\overline{SD_j}$ 为盆栽 j 计算生育期或时段内的平均受旱胁迫度。

2.2 相对生长率

Blachman 提出的作物生长解析法是指通过构建系列生长函数去解析作物生育特征及其与生长环境的关系,生长函数主要有:相对生长率(Relative Growth Rate, RGR)、净同化率(Net Assimilation Rate, NAR)、相对叶面积生长率(Relative Leaf Growth Rate, RLGR)、群体生长率(Crop Growth Rate, CGR)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)等。其中,相对生长率 RGR 是应用最为广泛的生长函数之一^[22-24]。

相对生长率是 Blachman 利用经济学中复利存款的概念来类比分析植物生长而提出的,即在单位时间内增长的干物质相当于存款利息的增加,这种利息的增加使本金(单位时间原来的干物质)越来越大,利率(干物质生产效率)也随之越来越大。单位干物质在单位时间内的干物质增长速率即为相对生长率或相对生长速度(Relative Growth Rate, RGR),其微分表达式如下^[22-23]:

$$R = \frac{1}{w} \frac{dw}{dt} \quad (7)$$

式中, R 为相对生长率; w 为作物总干物质质量; t 为时间。

对式(7)两边求积分得^[22-23]:

$$\int_0^t R dt = \int_{w_0}^w \frac{1}{w} dw \quad (8)$$

$$Rt = \ln w - \ln w_0 = \ln \frac{w}{w_0} \quad (9)$$

$$w = w_0 e^{Rt} \quad (10)$$

由式(10)可知,作物总干物质质量 w 是由时段初始总干物质质量 w_0 、时段持续时间 t 及时段内相对生长率 R 三项因子所决定。对式(7)两边取对数得^[22-23]:

$$\ln w = \ln w_0 e^{Rt} = \ln w_0 + Rt \quad (11)$$

$$R = \frac{\ln w_1 - \ln w_0}{t_1 - t_0} \quad (12)$$

式中, t_0 为时段初始时间,d; t_1 为时段结束时间,d; w_0 为 t_0 时的作物总干物质质量,g; w_1 为 t_1 时的作物总干物质质量,g; R 为 $t_0 \sim t_1$ 时段内的作物总干物质相对生长率, $g \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

2.3 基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性函数的构建

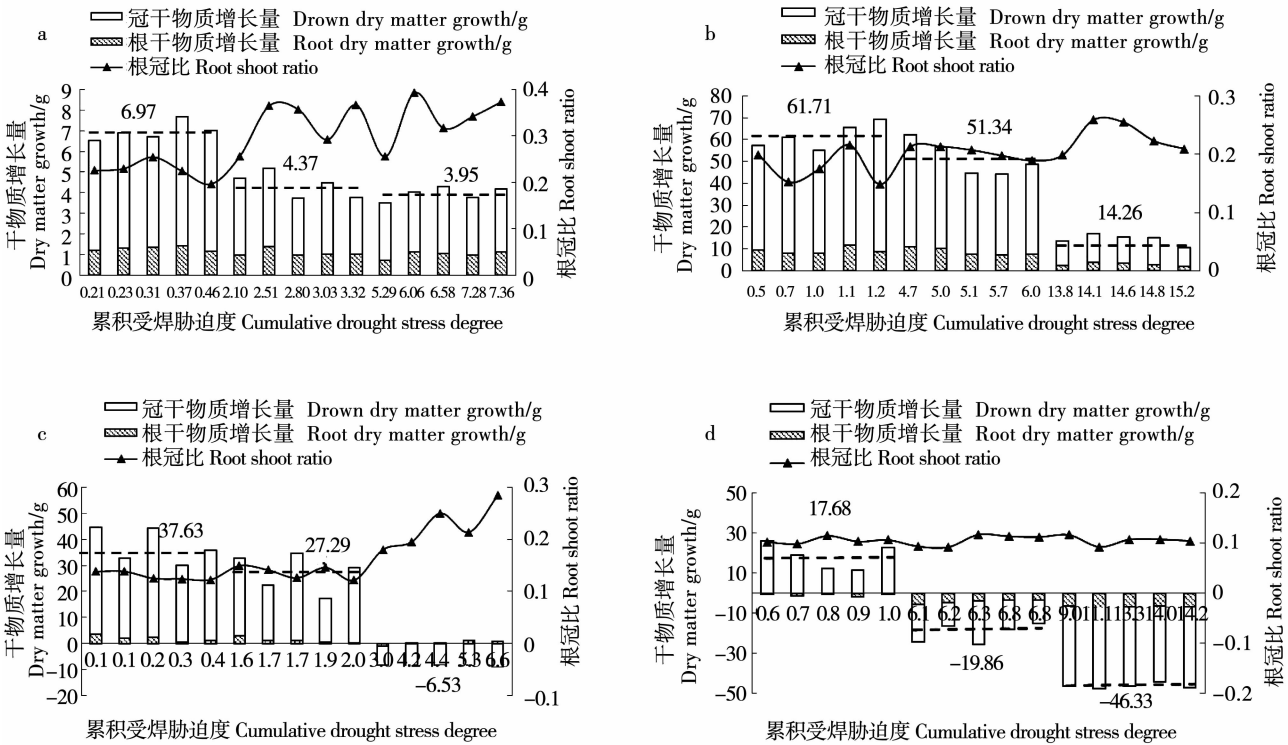
旱灾系统敏感性是指旱灾系统对致灾因子强度的响应程度或敏感程度,是旱灾风险产生的必要条件,也是旱灾系统由干旱演变为旱灾损失的中间转换环节。为区分并定量评估旱灾系统敏感性,本文定义大豆旱灾系统敏感性为旱灾系统在前期不受旱胁迫下对当期致灾因子强度的响应或敏感程度,响应方式包括根冠干物质累积量的变化、根冠干物质增长速率的变化、叶面积及光合作用强度的变化、株高及根长增长量的变化等。式(5)~式(6)中累积或平均受旱胁迫度实质上反映了受旱胁迫与充分供水下的水分亏缺程度,是对旱灾致灾因子强度大小的定量描述,本文以此作为致灾因子强度的量化指标。式(12)中相对生长率是指大豆在某时段内不同初始总干物质不同受旱胁迫程度下的总干物质平均相对增长速度,其大小反映了大豆在致灾因子作用下生长发育状况,为此,本文用某生育期内充分供水下的相对生长率与受旱胁迫下的相对生长率之差,即受旱胁迫下相对生长率的降低量,来描述旱灾系统对致灾因子强度的响应程度。基于此,计算各处理重复样本相应受旱胁迫生育期内的日均受旱胁迫度和总干物质相对生长率降低量,并分别进行 Logistic 曲线(S 型曲线)拟合,构建大豆基于相对生长率的旱灾系统敏感性函数,实现对大豆旱灾系统敏感性分生育期的定量评估。

3 结果与分析

3.1 大豆不同生育期受旱胁迫对根(冠)干物质积累的影响分析

由式(5)分别计算表 1 中各处理在受旱胁迫的生育期内累积受旱胁迫度,其反映大豆仅在某一生育期受旱胁迫时的累积受旱胁迫度;计算表 1 中各

处理在受旱胁迫的生育期内根、冠干物质增长量及根冠比,并统计分析受旱胁迫生育期内的根(冠)干物质增长量、根冠比与累积受旱胁迫度的关系,参见图1。



a: 苗期; b: 分枝期; c: 花荚期; d: 鼓粒成熟期。
a: Seedling stage; b: Branching period; c: Flowering-podding period; d: Mature period.

图1 大豆不同生育期受旱胁迫对根(冠)干物质及根冠比的影响

Fig. 1 Drought stress of soybean at different growth stages on dry matter accumulation of root and shoot and root-shoot ratio

由图1(a)可知,大豆苗期根(冠)干物质增长量均随累积受旱胁迫度的增大而减小,平均总干物质增长量对照、轻度受旱和重度受旱处理分别为6.97,4.37,3.95 g,可见,大豆苗期受旱胁迫会抑制干物质的增长,轻度和重度受旱胁迫处理较对照降低了37.3%和43.2%,但随受旱胁迫程度的变化不明显。此外,大豆苗期根冠比随受旱胁迫度的增加而显著增大,平均根冠比对照、轻度受旱和重度受旱处理分别为0.226、0.328、0.336,可见,大豆苗期受旱胁迫会导致根干物质增长速率比冠干物质增长速率大,表明大豆苗期受旱胁迫后,会激发自身适应受旱胁迫的机制,相对增大吸水器官根的生长发育而降低耗水器官冠的生长。

由图1(b)可知,大豆分枝期根(冠)干物质生长随受旱胁迫度的大小而显著变化,平均总干物质增长量对照、轻度受旱和重度受旱处理分别为61.71,51.34,14.26 g,轻度和重度受旱胁迫处理较对照降低了16.8%和76.9%,可见,大豆分枝期轻度受旱胁迫对干物质积累影响较小,但在重度受旱胁迫下会出现缺水性萎蔫而导致干物质积累显著减少。同时,大豆分枝期根冠比随受旱胁迫度的增加而增大,平均根冠比对照、轻度受旱和重度受旱

处理分别为0.178、0.204、0.229,表明大豆分枝期受旱胁迫与苗期类似,也能激发一定适应机制,增大吸水器官根的生长发育而降低耗水器官冠的生长。

由图1(c)可知,大豆花荚期在重度受旱胁迫下出现根(冠)干物质负增长现象,平均总干物质增长量对照、轻度受旱和重度受旱处理分别为37.63,27.29,-6.53 g,可见,大豆花荚期干物质积累对受旱胁迫均比较敏感,在重度受旱胁迫下出现缺水性萎蔫而叶枯现象,干物质质量出现萎缩。此外,大豆花荚期根冠比随受旱胁迫度的增大而变化显著,平均根冠对照、轻度受旱和重度受旱处理分别为0.130、0.137、0.225,可见,大豆花荚期在轻度受旱胁迫下根和冠的相对增长率与对照保持一致,而在重旱胁迫下根和冠的干物质均出现不同程度的萎缩,但冠干物质萎缩速度明显高于根的萎缩速率。

由图1(d)可知,大豆鼓粒成熟期在受旱胁迫下根(冠)干物质均出现不同程度的负增长现象,平均总干物质增长量对照、轻度受旱和重度受旱处理分别为17.68,-19.86,-46.33 g,可见,大豆鼓粒成熟期在不同受旱胁迫程度下均出现根(冠)干物质的负增长,尤其在重度受旱胁迫下出现缺水性萎蔫

而死苗,最终减产至无收获价值而绝收。从根冠比的角度看,大豆鼓粒成熟期受旱胁迫后根冠比与对照基本保持一致,对照、轻度受旱胁迫及重度受旱胁迫处理的平均根冠比分别为:0.105、0.106、0.106,表明大豆鼓粒成熟期受旱胁迫根和冠的干物

质均出现不同程度的萎缩,且根和冠的干物质萎缩速率基本一致,最终的根冠比均与对照处理一致。

3.2 干物质积累总量与产量相关性分析

基于本次大豆试验成果,统计分析大豆干物质积累总量与最终产量的相关关系,如图2所示。

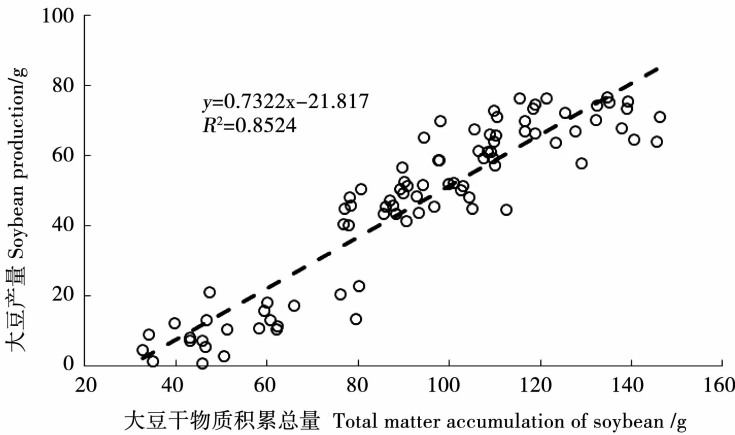


图2 不同受旱胁迫下大豆干物质积累总量与产量的相关关系

Fig. 2 Correlation between the total dry matter accumulation and yield of soybean under different drought stress

由图2可知,在本次大豆受旱胁迫试验最终收获的样品产量随积累干物质总量的增加而提高,产量与干物质积累总量具有显著正相关性,决定系数 R^2 为0.8524,这与杨慧杰等^[15]对福建省龙海和云南省的超高产水稻产量与干物质积累总量相关性研究结论一致。可见,大豆干物质积累总量与产量具有显著正相关性,通过研究大豆干物质增长量或增长率的变化规律来反映大豆生育特征及产量形成的变化是合理的。

3.3 基于相对生长率的大豆受旱胁迫下生育特征分析

由式(12)分别计算表1中各处理受旱胁迫生

育期内的总干物质相对生长率,综合反映大豆在受旱胁迫生育期内不同初始总干物质质量在不同受旱胁迫程度下的总干物质平均相对增长速度,其值大小变化反映了大豆在该生育期内对受旱胁迫程度的响应。为与总干物质相对增长率对应,由式(6)求取相应受旱胁迫生育期内的日均受旱胁迫度,其定量描述了生育期内不同土壤水分控制条件下的日均受旱胁迫度。据此,可定量分析大豆不同生育期生育特征与受旱胁迫程度的关系,具体如图3所示。

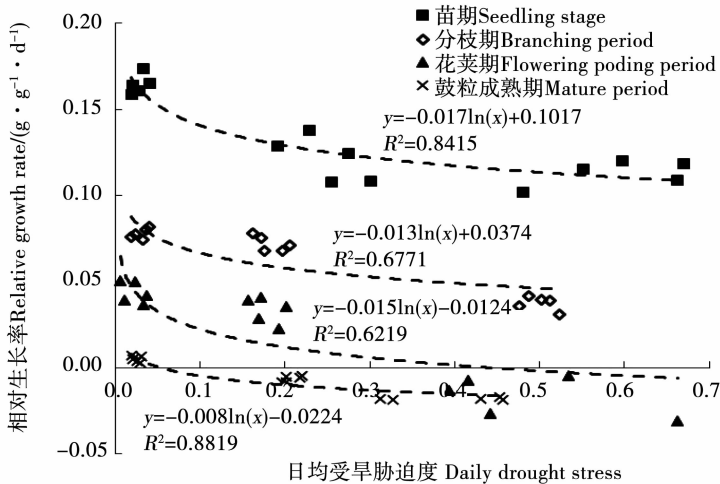


图3 大豆不同生育期受旱胁迫对总干物质相对生长率 RGR 的影响

Fig. 3 Drought stress at different growth stages of soybean effects on relative growth rate (RGR) of total dry matter

由图 3 可知,(1)大豆 4 个生育期的总干物质相对生长率 RGR 与日均受旱胁迫度均具有明显的负相关,决定系数 R^2 都为 0.621 9 ~ 0.881 9,表明本文提出的生育期内日均受旱胁迫度能较好反映生育期内不同土壤水分控制条件的受旱胁迫程度。(2)在相同时日均受旱胁迫度下,总干物质相对增长率 RGR 苗期 > 分枝期 > 花荚期 > 鼓粒成熟期,这主要由于大豆苗期为长苗发育关键期且初始干物质质量小,导致苗期 RGR 最大;大豆分枝期是大豆营养生长转向生殖生长的转折点^[32],花芽开始分化,是干物质积累最大的生育期,导致分枝期 RGR 较大,仅次于苗期;大豆花荚期是营养生长和生殖生长并进时期^[32],生长也非常旺盛,但 RGR 比分枝期小;大豆鼓粒成熟期营养生长基本停止,生殖生长占主导地位,植株体内有机营养大量向籽粒运移^[32],导致鼓粒成熟期 RGR 最小。(3)大豆苗期受旱胁迫

RGR 均会出现较大幅度降低,但随受旱胁迫度的增大 RGR 降低幅度不明显;大豆分枝期在轻度受旱胁迫下 RGR 降低较少,但随着旱灾致灾因子强度的增大 RGR 显著降低;大豆花荚期在受旱胁迫下 RGR 均会出现不同程度的降低,尤其在重度受胁迫下出现负增长现象;大豆鼓粒成熟期在受旱胁迫下均会出现负增长现象,但 RGR 降低幅度不大。

3.4 基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性函数

求取表 1 中各处理重复样本相应受旱胁迫生育期内的日均受旱胁迫度和总干物质相对生长率降低量,并对不同生育期受旱胁迫的样本点分别进行 Logistic 曲线(S 型曲线)拟合,求取大豆基于相对生长率的旱灾系统敏感性函数(具体结果见表 2 及图 4),实现对大豆旱灾系统敏感性分生育期的定量评估。

表 2 基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性函数
Table 2 Drought system sensitivity function of soybean based on relative growth rate

生育期 Growth Period	Logistic 拟合参数 Fitting parameters of Logistic				旱灾系统敏感性函数 Drought system sensitivity function
	a	b	c	决定系数 R ²	
				Coefficient of determination R ²	
苗期 Seedling stage	0.0585	119.51	31.19	0.789	$y = 0.0585 / (1 + 119.51 \times e^{-31.19x})$
分枝期 Branching period	0.0432	195.06	20.23	0.954	$y = 0.0432 / (1 + 195.06 \times e^{-20.23x})$
花荚期 Flowering-podding period	0.0747	57.53	14.70	0.910	$y = 0.0747 / (1 + 57.53 \times e^{-14.70x})$
鼓粒成熟期 Mature period	0.0260	83.80	21.58	0.949	$y = 0.0260 / (1 + 83.80 \times e^{-21.58x})$

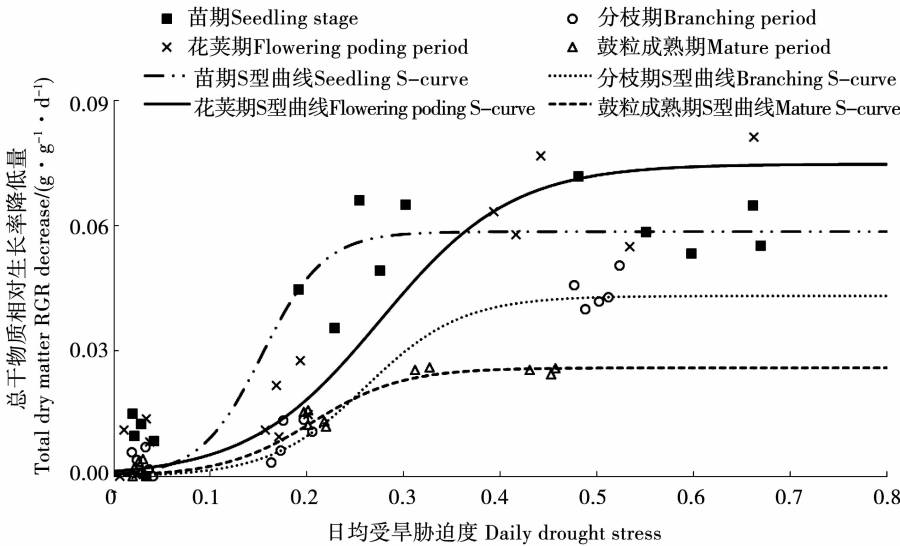


图 4 基于相对生长率的大豆旱灾系统敏感性函数
Fig. 4 Drought system sensitivity function of soybean based on relative growth rate

由表 2 及图 4 可知:(1)大豆 4 个生育期的总干物质相对生长率 RGR 降低量与日均受旱胁迫度的 Logistic 曲线(S 型曲线)拟合的决定系数 R^2 都在 0.789 ~ 0.954 之间,表明用 Logistic 曲线拟合基于相对生长率的旱灾系统敏感性函数是适宜的。(2)

大豆基于相对生长率的旱灾系统敏感性函数由直线 $x = 0.24$ 和 $x = 0.36$ 划分为 3 个区域,基本反映大豆轻度、中度和重度水分胁迫下不同生育期的系统敏感性。(3)当日均受旱胁迫度小于 0.24 时(轻度受旱胁迫),大豆旱灾系统敏感性从大到小的顺

序为苗期 > 花荚期 > 鼓粒成熟期 > 分枝期,表明大豆在轻度受旱胁迫苗期相对生长率 RGR 降低最大,分枝期 RGR 降低最少,这主要由于大豆根系在分枝期最为发达,在轻度受旱胁迫下,能保证生长所需供水,几乎不对干物质积累造成影响,而苗期是根系分布最浅时期,在轻度受旱胁迫下就会显著抑制其生长发育,导致 RGR 降低最大。(4)当日均受旱胁迫度大于 0.24 而小于 0.36 时(中度受旱胁迫),大豆旱灾系统敏感性从大到小的顺序为苗期 > 花荚期 > 分枝期 > 鼓粒成熟期,大豆在中度受旱胁迫下花荚期和分枝期 RGR 降低量较轻度受旱胁迫显著增加,导致中度受旱胁迫下分枝期 RGR 降低量超过鼓粒成熟期。(5)当日均受旱胁迫度大于 0.36 时(重度受旱胁迫),大豆旱灾系统敏感性从大到小的顺序为花荚期 > 苗期 > 分枝期 > 鼓粒成熟期,这主要由于大豆在重度受旱胁迫下苗期 RGR 降低量几乎与中度受旱胁迫相同,而花荚期 RGR 降低量较轻度受旱胁迫显著增加而出现干物质累积负增长现象,导致重度受旱胁迫下花荚期 RGR 降低量超过苗期。(6)大豆鼓粒成熟期营养生长基本停止,植株体内有机营养大量向籽粒运移^[32],而总干物质积累几乎停滞,在此生育期内受旱胁迫均会导致总干物质积累不同程度的负增长,但由于大豆即使在充分供水下干物质积累也几乎零增长,同时该生育期初始总干物质积累量最大,导致基于总干物质相对生长率而言,鼓粒成熟期在不同受旱程度下相对生长率降低量都最小。

4 结论与讨论

针对大豆旱灾系统敏感性定量评估问题的复杂性与重要性,依托新马桥农水综合灌溉试验站开展大豆不同生育期不同受旱胁迫程度下的防雨棚盆栽专项试验,提出了基于土壤含水率的旱作物受旱胁迫度指标 h_d 来定量表达旱作物某时段或全生育期内的受旱胁迫程度,分析了大豆不同生育期受旱胁迫对根(冠)干物质积累及根冠比的影响,运用作物生长解析法构建了大豆旱灾系统敏感性曲线,进而实现对大豆旱灾系统敏感性的定量评估,得到的具体结论如下:(1)大豆苗期受旱胁迫均会出现相对生长率 RGR 较大幅度的降低,但随着受旱胁迫度的增大对大豆生长和干物质积累的抑制作用不明显,且受旱胁迫会激发自身适应受旱胁迫的机制而可能对后期生长发育有利,该生育期相机控制水分供给,保证苗全即可;(2)大豆分枝期旱灾系统敏感性较大,但该生育期内轻度受旱胁迫对大豆生长发育影响不明显,宜保证该生育期水分供给高于轻

度受旱胁迫(土壤含水率 > 田间持水含水率的 55%),以保障大豆株壮、枝多;(3)大豆花荚期是水分和养分需求最大的时期,该生育期旱灾系统敏感较大,尤其重度受旱胁迫时系统敏感性最大,宜充分保证该生育期的水分供给(土壤含水率 > 田间持水含水率的 75%),以保障大豆花多、荚多、粒多;(4)大豆鼓粒成熟期由于营养生长基本停止、干物质积累几乎停滞,导致基于总干物质相对生长率旱灾系统敏感性最小,但该期是产量形成的关键期,宜保证该生育期尤其鼓粒期的水分供给(土壤含水率 > 田间持水含水率的 75%),以保障大豆最后粒多、粒重。

参考文献

[1] Shahid S, Behrawan H. Drought risk assessment in the west part of Bangladesh[J]. Natural Hazard,2008,46(3): 391-413.

[2] 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): 389-412. (Jin J L, Song Z Z, Cui Y, et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(3): 389-412.)

[3] 张继权,刘兴明,严登华. 综合灾害风险管理导论[M]. 北京: 北京大学出版社,2012. (Zhang J Q, Liu X , Yan D H. Introduction of integrated disaster risk management [M]. Beijing: Peking University Press, 2012.)

[4] 金菊良,酆建强,周玉良,等. 旱灾风险评估的初步理论框架[J]. 灾害学,2014,29(3): 1-10. (Jin J L, Li J Q, Zhou Y L, et al. Theoretical framework of drought risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014,29(3): 1-10.)

[5] 商彦蕊. 灾害脆弱性概念模型综述[J]. 灾害学,2013,28(1): 112-116. (Shang Y R. Review on concept model of disaster vulnerability [J]. Journal of Catastrophology, 2013,28(1): 112-116.)

[6] 马晓群,姚筠,许莹. 安徽省农作物干旱损失动态评估模型及其试用[J]. 灾害学,2010,25(1): 13-17. (Ma X Q, Yao Y, Xu Y. A model for dynamic assessment of crop yield losses from drought and its tryout in Anhui province [J]. Journal of Catastrophology, 2010,25(1): 13-17.)

[7] Huang J Y, Liu Y, Ma L, et al. Methodology for the assessment and classification of regional vulnerability to natural hazards in China: The application of a DEA model [J]. Natural Hazards, 2013,65(1): 115-134.

[8] 裴欢,王晓妍,房世峰. 基于 DEA 的中国农业旱灾脆弱性评价及时空演变分析[J]. 灾害学,2015,30(2): 64-69. (Pei H, Wang X Y, Fang S F. Study on temporal-spatial evolution of agricultural drought vulnerability of China based on DEA model [J]. Journal of Catastrophology, 2015,30(2): 64-69.)

[9] 茆智,崔远来,李新健. 我国南方水稻水分生产函数试验研究[J]. 水利学报,1994(9): 21-31. (Mao Z, Cui Y L, Li X J. Study of water production function for rice in south China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(9): 21-31.)

[10] 韩松俊,刘群昌,王少丽,等. 作物水分敏感指数累积函数的

- 改进及其验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 83-88. (Han S J, Liu Q C, Wang S L, et al. Improvement and verification of cumulative function of crop water sensitive index[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 83-88.)
- [11] Todisco F, Mannocch F, Vergni L. Severity-duration-frequency curves in the mitigation of drought impact: An agricultural case study [J]. Natural Hazards, 2013, 65(3): 1863-1881.
- [12] 赵青松, 陈林, 孙波, 等. 基于 Hadoop 的云环境下作物生长模型算法的实现与测试[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 179-186. (Zhao Q S, Chen L, Sun B, et al. Algorithm implementation and tested of crop growth model based on Hadoop of cloud computing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 179-186.)
- [13] 赵姣, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 300-308. (Zhao J, Zheng Z F, Fang Y R, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 300-308.)
- [14] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. 中国农业大学, 2011, 16(5): 32-38. (Qiao J, Zhu J C, Zhao J, et al. Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(5): 32-38.)
- [15] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 等. 超高产水稻的干物质生产特性研究[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 265-270. (Yang H J, Li Y Z, Yang R C, et al. Dry matter production characteristics of super high yielding rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2001, 15(4): 265-270.)
- [16] 葛慧玲, 龚振平, 马春梅, 等. 灌溉水平及灌溉间隔对大豆植株干物质积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 30-35. (Ge H L, Gong Z P, Ma C M, et al. Effect of irrigation schedule of dry matter of the shoots of soybean[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 30-35.)
- [17] 宋微微, 杜吉到, 郑殿峰, 等. 大豆干物质积累、分配规律的研究进展[J]. 大豆科学, 2008, 27(6): 1062-1066. (Song W W, Du J D, Zheng D F, et al. Research progress on dry matter accumulation and distribution rules of soybean population[J]. Soybean Science, 2008, 27(6): 1062-1066.)
- [18] 沈融, 章建新, 苏广禄, 等. 不同时期水分亏缺对高产大豆植株地上部分生长的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(4): 297-301. (Shen R, Zhang J X, Su G L, et al. Effect of water deficit in different period on aerial part growth of high-yield soybean plant [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011, 34(4): 297-301.)
- [19] 刘丽君, 林浩, 唐晓飞, 等. 干旱胁迫对不同生育阶段大豆产量形态建成的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(3): 405-412. (Liu L J, Lin H, Tang X F, et al. Drought stress influence soybean yield morphogenesis in different growth stages [J]. Soybean Science, 2011, 30(3): 405-412.)
- [20] Boote K J. Effects of water stress on leaf area index, crop growth rate and dry matter accumulation of field-grown corn and soybean [J]. Field Crops Research, 2013, 21(89): 171-187.
- [21] 张立军, 孙旭刚, 王昌陵, 等. 盆栽条件下水肥调控对大豆生长和产量的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(3): 398-403. (Zhang L J, Sun X G, Wang C L, et al. Regulation effect of water and fertilizer on growth and yield in soybean under pot experiment condition [J]. Soybean Science, 2014, 33(3): 398-403.)
- [22] Singh H, Singh G. Dry matter accumulation, nodulation, yield attributes and yield of soybean (*Glycine max* L. Merrill) as affected by potassium and split application of nitrogen [J]. Indian Journal of Ecology, 2011, 38(2): 206-210.
- [23] 石勇, 许世远, 石纯, 等. 自然灾害脆弱性研究进展[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 131-137. (Shi Y, Xu S Y, Shi C, et al. Progress in research on vulnerability of natural disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2): 131-137.)
- [24] Blackman V H. The compound interest law and plant growth [J]. Annals of Botany, 1919, 33(3): 353-360.
- [25] 张秀如. 生长解析法及其在棉花科研中的初步应用[J]. 华中农学院学报, 1984, 3(4): 1-8. (Zhang X R. Growth analysis method and its application in scientific research of cotton [J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1984, 3(4): 1-8.)
- [26] Pommerening A, Muszta A. Methods of modelling relative growth rate [J]. Forest Ecosystems, 2015, 2(1): 1-9.
- [27] 国家气象中心, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 等. GB/T 32136-2015 农业干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. (National Meteorological Center, Institute of Agricultural Resources and Agricultural Regionalization of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, et al. GB/T 32136-2015 Grade of agricultural drought [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.)
- [28] 王书吉, 康绍忠, 李涛. 基于节水高产优质目标的冬小麦适宜水分亏缺模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 111-118. (Wang S J, Kang S Z, Li T. Suitable water deficit mode for winter wheat basing objective of water saving as well as high yield and quality [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 111-118.)
- [29] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052. (Li B Z, Zhou G S. Advance in the study on drought index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043-1052.)
- [30] 姚玉璧, 张存杰, 邓振镛, 等. 气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 185-189, 211. (Yao Y B, Zhang C J, Deng Z Y, et al. Overview of meteorological and agricultural drought indices [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 185-189, 211.)
- [31] 汤广民, 蒋尚明. 水稻的干旱指标与干旱预报[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 54-58. (Tang G M, Jiang S M. Drought index and drought prediction for rice [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(8): 54-58.)
- [32] 胡立勇, 丁艳锋. 作物栽培学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (Hu L Y, Ding Y F. Crop cultivation [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.)