水分胁迫对春大豆出苗和幼苗长势的影响

李秀芬[1,2] 马树庆[3,4*] 李云峰[4] 于 海[5] 徐丽萍[5] 陈凤涛[5] 张洪伟[5] 翟 墨[1,2]

([1]中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 哈尔滨 150030; [2]黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030; [3]吉林省气象台, 长春 130062; [4]吉林省气象服务中心, 长春 130062; [5]吉林省榆树市气象局, 吉林榆树 130400)

摘 要 为探究春大豆播种至幼苗期干旱对大豆出苗速度、出苗率和幼苗长势的影响及春旱指标,以指导春旱评估和抗旱灌溉,于 2017 和 2018 年在吉林省中部开展田间土壤水分控制试验。通过防雨棚和人工喷水控制土壤水分,设置 7 个土壤水分处理和 1 个自然雨养处理,观测土壤湿度、出苗期、出苗率、株高、叶龄和生物量等。采用回归方法分析土壤湿度对出苗期、出苗率及幼苗长势的影响,据此建立大豆春旱评估指标。结果表明:大豆出苗期、出苗率、苗期株高、叶龄和生物量与播耕层土壤水分关系密切,在试验处理范围内(土壤湿度 24%以下),土壤湿度每下降 1%,出苗期延迟 1~2 d,出苗率下降 1.6%,相对叶龄、株高和地上生物量分别下降 6.1%、5.4%、10.2%;土壤湿度 20%~23%适宜大豆出苗,21%~24%适宜幼苗生长;大豆轻旱、中旱、重旱和特旱的土壤湿度指标依次为 0~10 cm 土壤湿度 16%~17%、14%~15%、12%~13%和 12%以下,0~20 cm 土壤湿度依次在 17%~18%、15%~16%、13%~14%和 13%以下。

关键词 春大豆; 土壤水分胁迫; 苗情; 相关模式; 春旱指标

Effects of soil water stress on emergence and seedling growth of spring soybean. LI Xiu-fen[1,2], MA Shu-qing[3,4*], LI Yun-feng[4], YU Hai[5], XU Li-ping[5], CHEN Feng-tao[5], ZHANG Hong-wei[5], ZHAI Mo[1,2] ([1]*Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-Meteorology in Northeast China, CMA, Harbin* 150030, *China*; [2]*Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin* 150030, *China*; [3]*Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun* 130062, *China*; [4]*Meteorological Service Center of Jilin Province, Changchun* 130062, *China*; [5]*Yushu Meteorological Bureau of Jilin Province, Yushu* 130400, *Jilin, China*).

Abstract: We carried out a field soil moisture control experiment in central Jilin Province in 2017 and 2018 to explore the effects of drought on seedling emergence speed, seedling rate and seedling growth during spring sowing to seedling period, and the spring drought index, with the final aim to guide the spring drought assessment and drought control irrigation. Soil moisture was controlled by rainproof sheds and artificial water spraying. There were seven soil moisture levels and one natural rain-fed treatment. We measured soil moisture, emergence date, emergence ratio, plant height, leaf age and biomass. The effects of soil moisture on emergence date, emergence ratio and seedling growth potential were analyzed by regression method, and the evaluation index of soybean spring drought was established accordingly. The results showed that soybean emergence date, emergence rate, plant height, leaf age and aboveground biomass were closely related to soil moisture in the sowing layer. Under the range of experiment treatment (soil moisture was less than 24%), with every 1% decrease of soil moisture, the emergence date was delayed for 1-2 d, the emergence rate was decreased by 1.6%, and the relative leaf age, seedling height and aboveground biomass were decreased by 6.1%, 5.4% and 10.2%, respectively. Suitable soil moisture for soybean emergence ranged between 20% and 23%, and for seedling growth ranged

国家自然科学基金项目(31671576,31801253)、中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放研究基金项目(stqx2019zd02)、黑龙江省自然科学基金项目(D2018007)和中国气象局预报核心技术(CMAHX20160205)资助。
收稿日期: 2020-01-08 接受日期: 2020-05-15
*通讯作者 E-mail: jlmasq@aliyun.com

between 21% and 24%. The indicators of light, moderate, severe and extreme drought in spring were as follows: soil humidity in 0-10 cm was 16%-17%, 14%-15%, 12%-13% and <12%, respectively; in 0-20 cm was 17%-18%, 15%-16%, 13%-14% and <13%, respectively.

Key words: spring soybean; soil water stress; seedling growth situation; assessment model; spring drought indicator.

大豆是经济上重要的油料和蛋白质作物,其生长发育、产量和品质形成及种植区域都与气象条件有关(胡明祥等,1990;马树庆,1996;Thomas *et al.*,2003;郝兴宇等,2010;李彤霄,2015;宋梦美等,2017;王畅等,2018)。气候变暖和无霜期延长,导致大豆种植界限北移(姜丽霞等,2011;邱译萱等,2018);温度升高加速了大豆生长发育,吉林春大豆生长季平均气温每升高 1 ℃,大豆生育天数缩短约 5.4 d(李彩侠等,2014)。大豆对水分条件敏感,不同时期水分亏缺对高产大豆植株生长影响显著(沈融等,2011;王兴荣等,2018),导致大豆株高、株重、分枝数、株荚数、株粒数、百粒重和产量等降低(王敏等,2010),适当的灌溉有利于获得较高的单株荚数、单株粒数、百粒重,进而得到更高的产量(杜孝敬等,2019)。大豆结荚-鼓粒期对水分的反应最为敏感,结荚期干旱胁迫持续时间越长,大豆植株生长受抑制情况越明显(邹京南等,2019)。干旱胁迫导致大豆叶绿素含量逐渐降低(赵坤,2010;邹京南等,2019),苗期和结荚期干旱迫使根系活力降低,鼓粒期干旱会使大豆蛋白质含量和百粒重下降,脂肪含量升高(江英泽等,2019)。大豆出苗期、出苗率及幼苗长势很大程度上决定了大豆后期生长状况和产量丰欠。干旱胁迫对大豆种子萌发和幼苗生长均有较强的抑制作用,影响程度与干旱程度正相关,中度以上干旱明显延迟种子发芽的时间(Bouslama *et al.*,1984;庞艳梅,2008;莫金钢等,2014)。苗期健壮生长是大豆生殖生长和产量品质形成的基础。研究表明,苗期干旱胁迫导致大豆幼苗矮小,叶面积指数降低(David,2009),叶绿素含量降低(赵坤,2010;邹京南等,2019),根系活力降低,从而影响大豆生物量累积(Karam *et al.*,2005;王敏等,2010),造成大豆产量降低。

东北地区是我国主要春大豆种植区,大豆播种面积约占全国的 41.4%,总产约占全国的 44.5%(薛庆喜,2013)。东北地区气温适宜,光照充足,土壤较肥,适宜大豆栽培,但多数地方雨水不足,降水年际、月际波动较大,而大豆需水量较大,抗旱能力相对较弱(崔振才,2003;郝兴宇等,2010),因此东北地区大豆生长季干旱比较频繁,大豆春播期时常遭遇干旱。春旱导致种子不发芽、出苗迟、不出苗或出苗较差,导致大豆田缺苗现象严重、苗弱、生育期拖后,严重影响了大豆安全成熟及稳产高产,加大了大豆安全生产的风险。尽管相关研究较多,但目前东北土壤干旱对大豆生长和产量形成的影响规律尚不清楚,干旱指标尚不明确。为了配合东北地区大豆生产恢复性发展和农业生态结构调整,于 2017—2018 年在吉林省榆树市农业气象试验站开展春季大豆水分控制试验研究,以揭示大豆出苗和幼苗生长状况对土壤水分胁迫的反应规律,探究大豆春旱指标体系,其结果对采取合理灌溉措施提高大豆出苗率、保障大豆稳产高产具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点和处理方法

试验在榆树市农业气象试验站进行,位于吉林省中部(44°51′N,126°31′E),当地常年≥10 ℃活动积温 2933 ℃ · d,无霜期 161 d,期间雨量约 472 mm。试验场距气象观测场 150 m,试验地平坦,平均海拔 196.5 m,土壤为黑壤土,肥力为当地中等水平。0~10 cm 土层田间持水量、土壤容重和凋萎湿度分别为 26.6%、1.27 g · cm^{-3}和 11.3%,10~20 cm 土层为 24.8%、1.36 g · cm^{-3}和 11.8%。供试大豆品种为'吉育 47',为当地主推的中晚熟品种,适宜播种密度 1.9~2.1 万株 · hm^{-2}。该品种耐旱性中等,播种至成熟所需≥10 ℃活动积温 2900 ℃ · d,全生育期 138 d 左右,在当地不存在低温影响。

通过建立防雨棚和人工喷水措施控制土壤水分。防雨棚为钢架塑料拱棚,两头通风。棚顶脊高约 2.0 m,棚角高度 1.0 m,棚长 22 m,宽 9 m。降雨时展开塑料布遮盖棚顶,雨后卷起,自然通风透光。防雨棚内设 6 个水分胁迫处理,棚外设 1 个灌水处理(偏湿润处理)和 1 个自然雨养处理,每个处理小区 3 m×3.5 m = 10.5 m^2。每个小区四周埋塑料膜,防止横向水分相互渗透,深度 33 cm。两年均为 5

月 7 日播种,为当地普遍播种期。采用现行的垄作栽培,每小区 5 垄,株距 9.0 cm,密度为 19 粒(株)·m^{-2},播种深度 5~6 cm。根据土壤湿度和干旱情况,用喷壶每隔 5~10 d 浇水 1 次,每次最多浇水量相当于自然降水量 20 mm,使土壤湿润深度不超过 20 cm,浇灌的水分没有渗漏和流出。通过灌水与否及灌水多少来控制 0~30 cm 深土壤湿度,尽可能使 7 个水分控制小区土壤湿度出现由略湿润、不旱、轻旱至严重干旱的梯度变化,依次标记为 H_1、H_2(对照)、H_3、H_4、H_5、H_6 和 H_7 区,棚外雨养为 H_8,两年共 16 个样本。在各小区大豆长至三真叶期后(不旱和偏湿区已达到分枝期),结束人工土壤水分控制,敞开防雨棚,各小区大豆都处在自然条件下,而后如发生自然干旱,适量普遍等量灌水,使土壤水分基本适宜,不再发生明显旱象。

1.2 观测项目及方法

观测 0~30 cm 土壤湿度、出苗期、出苗率、株高、叶龄和地上生物量等。受小区面积限制,地上总生物量观测每小区取 6 株,两次重复,其他各项观测方法依据《农业气象观测规范》。土壤湿度分 0~10、10~20 和 20~30 cm 3 个土层,采用土钻法每隔 5 d 左右测土,其中浇水前 1 d 和浇水后 1 d 必测,用浇水前的土壤湿度判定灌水与否及灌水量。在不旱小区的大豆长到分枝期、特旱小区也达到三真叶期以上时,同时测量各小区幼苗的株高、叶龄和地上部分生物量,2017 年测量日期(以下简称测苗日)为 6 月 16 日,2018 年为 6 月 25 日。以不旱小区(H_2)为对照,计算出苗期推迟天数、相对叶龄、相对株高和相对地上生物量(干重)。考虑到大豆播种深度和三真叶期的根深,大豆播种—出苗期选取 0~10 cm 土壤湿度,出苗—三真叶期选取 0~20 cm 土壤湿度(0~10 cm、10~20 cm 2 个层次土壤湿度的平均值),采用回归方法分析这些生长要素对相应层次土壤湿度的反应规律,进而推算大豆春旱等级指标。

2 结果与分析

2.1 各处理土壤湿度和苗情观测结果

2017 年大豆生长期间(5—9 月)≥10 ℃积温 2940 ℃·d,降雨量 472 mm;2018 年分别为 3050 ℃·d和 408 mm。播种至出苗期间,2017 年雨量 42 mm,属正常偏少;2018 年仅 11.1 mm,发生严重春旱。统计整理试验小区土壤湿度和生长状况等观测数据,其中各小区土壤湿度梯度变化明显(图 1),播种至出苗期间 0~10 cm 土壤湿度在 8.4%~23.0%范围(图 1a),0~20 cm 土层的在 11.0%~24.4%范围(图 1b);出苗至测苗日 0~20 cm 土壤湿度在 14.2%~23.2%(图 1c)。由于试验期间自然降水较少,加之浇水不够多,导致棚外偏湿的 H_1 小区的土壤湿度在 23%左右,属于适宜范围,未形成过涝现象。

出苗率、播种—出苗天数、株高、叶龄、生物量差异也较大,多数表现为土壤湿润的出苗明显偏早(图 2),且长势好(图 3)。2017 年土壤湿度较大的出苗率较高,但 2018 年浇水量和浇水时间控制不够细致,各区出苗率变化规律不十分明显。

2.2 土壤水分对出苗期和出苗率的影响

大豆种子吸足水分才能发芽出苗,因此土壤干燥与否直接影响出苗时间及出苗率。水分适宜或不旱的 H_1、H_2 区的出苗较早,播种后 11 天左右出苗,而严重干旱的播种一个月后才出苗。计算各小区相

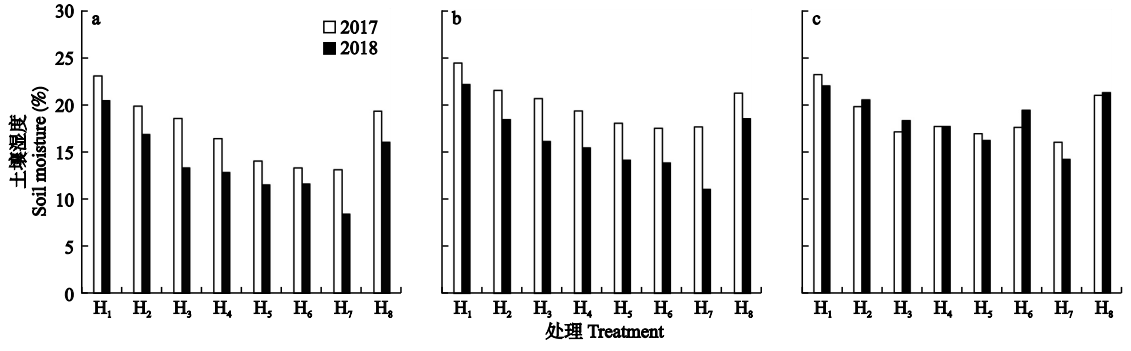


图 1 各处理土壤湿度

Fig.1 Soil moisture of each treatment

注:a:播种至出苗期间 0~10 cm 土层;b:播种至出苗期间 0~20 cm 土层 c:出苗至测苗日 0~20 cm 土层。

Note: a: 0-10 cm soil layer from sowing to emergence; b: 0-20 cm soil layer from sowing to emergence; c: 0-20 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date.

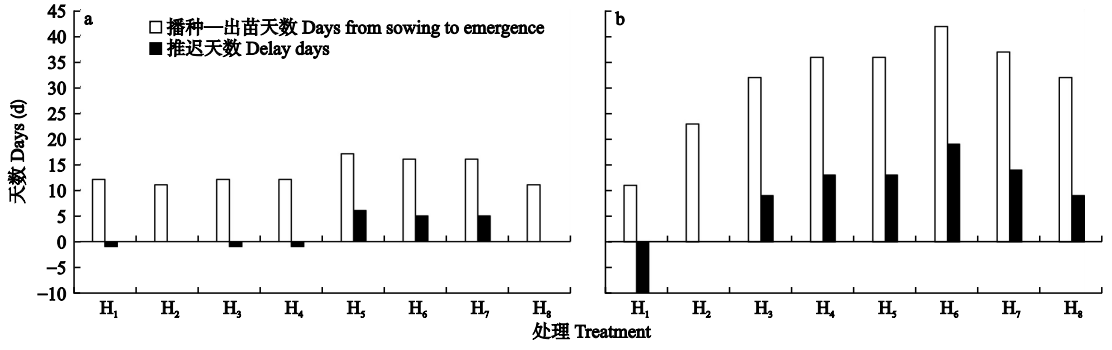


图 2 各处理播种—出苗天数及其延迟天数(a: 2017 年,b:2018 年)

Fig.2 Days from sowing to emergence and its delay days of each treatment (a: 2017, b:2018)

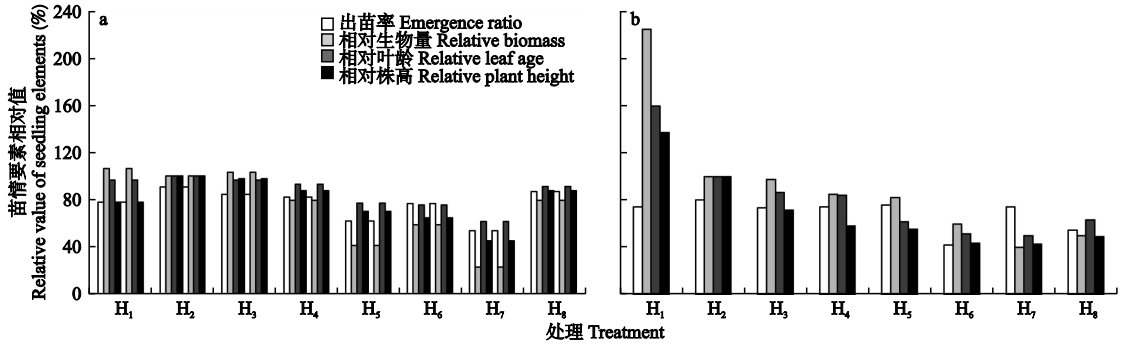


图 3 各处理出苗率及相对的叶龄、生物量和株高(a:2017 年,b:2018 年)

Fig.3 Emergence ratio and relative leaf age, biomass and plant height of each treatment (a: 2017, b:2018)

对于棚内 H_2 区的出苗期推迟天数(D),分析 D 与 0~10 cm土壤湿度(W_1)和 0~20 cm 层土壤湿度(W_2)的关系(图 4)。可见,出苗期早晚与土壤湿度呈显著的线性关系,在试验数据范围内,土壤湿度 21%左右利于大豆发芽出苗,播种后 10 d 左右即可出苗,土壤湿度每降低 1 个百分点,出苗期延迟 1~2 d。由于没有获得涝害的样本,因此相关方程是线性的,没能确定不利于出苗的土壤湿度上限。但根据试验数据初步认为,土壤湿度 24%以上不利于大豆发芽出苗。

综合分析两年试验数据的结果表明,大豆出苗率与土壤湿度呈显著的线性相关(图 5),W_1或 W_2每提升 1 个百分点,出苗率提升 1.6 个百分点。W_1在 20%以上,或 W_2在 23%以上,出苗率在 80%以上,出苗率较高;W_1在 13%以下,或 W_2在 15%以下,出苗率在 70%以下,出苗率低。土壤湿度在 12%左右持续 20 多天后少量补水仍然有 60%左右出苗,说明大豆种子发芽出苗期间抗旱性还是比较强的。

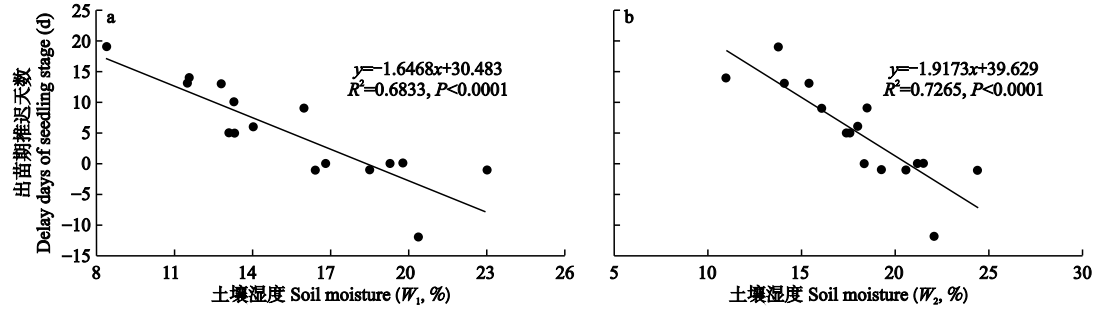


图 4 出苗期推迟天数与土壤湿度的关系

Fig.4 Relationship between delay days of emergence and soil moisture

注: a:播种至出苗期间 0~10 cm 土层; b: 播种至出苗期间 0~20 cm 土层。下同。

Note: a: 0−10 cm soil layer from sowing to emergence; b: 0−20 cm soil layer from sowing to emergence. The same below.

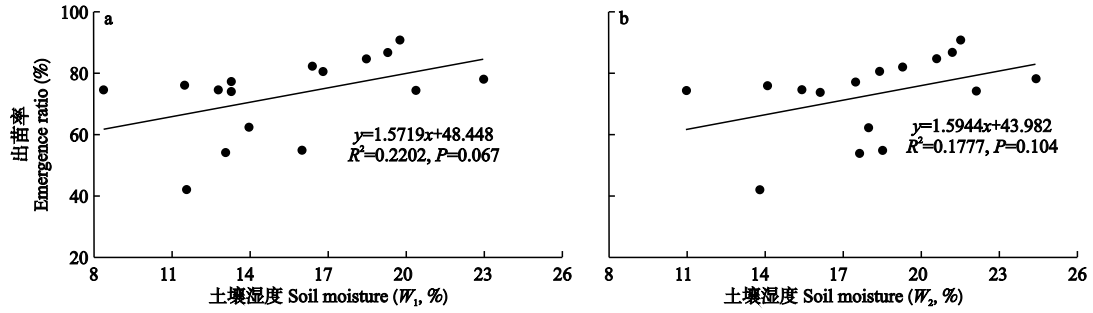


图 5 出苗率与播种至出苗土壤湿度的关系

Fig.5 Relationship between emergence ratio and soil moisture from sowing to emergence

注：a：播种至出苗期间 0~10 cm 土层；b：播种至出苗期间 0~20 cm 土层。

Note: a: 0-10 cm soil layer from sowing to emergence; b: 0-20 cm soil layer from sowing to emergence.

2.3 土壤水分对幼苗长势的影响

两年试验数据显示，出苗至测苗日 0~10 cm 土壤湿度（W_3）、0~20 cm 土壤湿度（W_4）与大豆相对叶龄、株高、生物量均呈线性相关（图 6~8）。其中，W_3或 W_4每提升 1 个百分点，相对叶龄分别提升 3.6 和 6.1 个百分点，相对株高分别提升 3.1 和 5.4 个百分点，相对生物量分别提升 7.8 和 10.3 个百分点，说明大豆幼苗生长对 W_4更敏感。对于相对叶龄，W_3在 19%以上，或 W_4在 21%以上，幼苗相对叶龄达到 90%以上，幼苗叶生长迅速；W_3在 14%以下，或 W_4在 17%以下，相对叶龄在 70%以下，叶长势偏差；W_4在 15%以下相对叶龄 50%以下，幼苗叶生长缓慢或停滞。对于相对株高，W_3在 20%以上，或 W_4在 22%以上，幼苗相对株高达到 80%以上，幼苗生长快；W_4在 16.5%以下，相对株高在 60%以下，长势偏差。W_4在 15%以下相对株高 50%以下，幼苗生长缓慢或停滞。

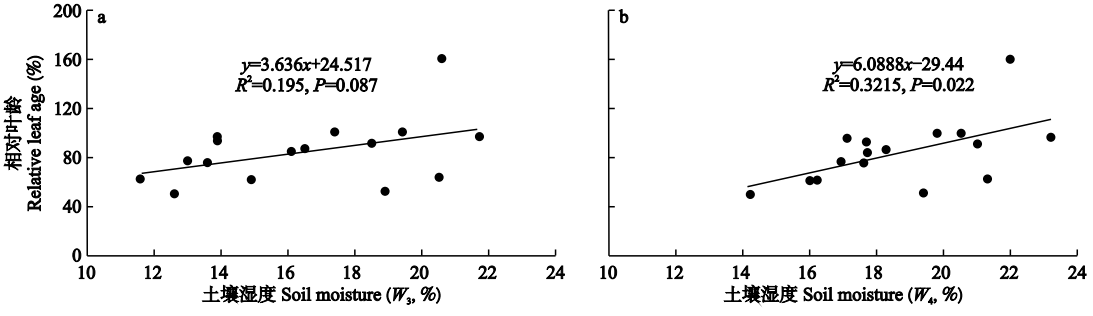


图 6 大豆苗期相对叶龄与土壤湿度的关系

Fig.6 Relationship between relative leaf age and soil moisture in soybean seedling stage

注：a：出苗至测苗日 0~10 cm 土层，b：出苗至测苗日 0~20 cm 土层。

Note: a: 0-10 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date, b: 0-20 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date.

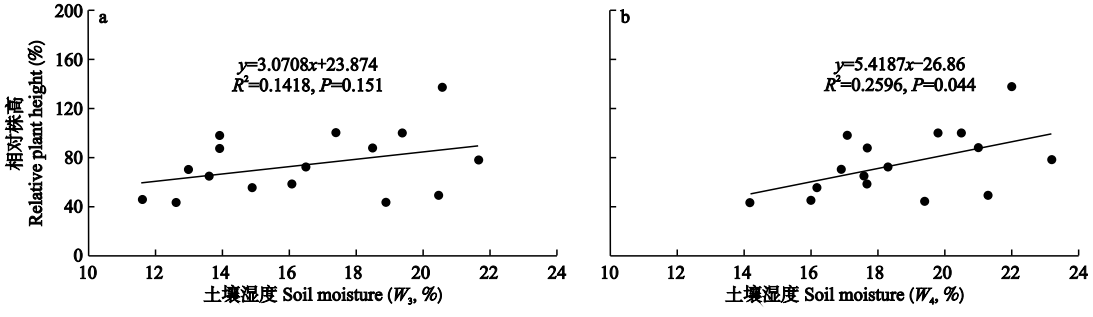


图 7 大豆苗期幼苗相对高度与土壤湿度的关系

Fig.7 Relationship between relative height and soil moisture in soybean seedling stage

注：a：出苗至测苗日 0~10 cm 土层，b：出苗至测苗日 0~20 cm 土层。

Note: a: 0-10 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date, b: 0-20 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date.

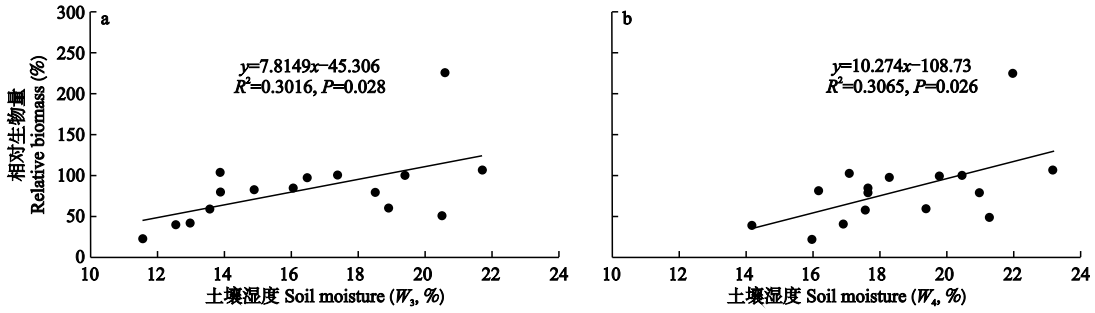


图 8 大豆苗期幼苗相对生物量与土壤湿度的关系

Fig.8 Relationship between relative biomass and soil moisture in soybean seedling stage

注:a:出苗至测苗日 0~10 cm 土层,b:出苗至测苗日 0~20 cm 土层。

Note: a: 0-10 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date, b: 0-20 cm soil layer from emergence to seedling growth measuring date.

表 1 大豆春旱土壤湿度等级及对应的苗情状况评估

Table 1 Index grade of soil moisture of soybean in spring drought and evaluation of its corresponding seedling situation

土壤湿度等级 Soil moisture grade	0~10 土壤湿度 0-10 cm soil moisture (%)		0~20 土壤湿度 0-20 cm soil moisture (%)		播种—出苗天数 Days from sowing to emergence (d)	出苗率 Emergence ratio (%)	相对叶龄 Relative leaf age (%)	相对株高 Relative plant height (%)	相对生物量 Relative biomass (%)
	绝对 Absolute	相对 Relative	绝对 Absolute	相对 Relative					
适宜 Suitable	20~23	76~89	21~24	81~92	9~12	>89	>96	>86	>96
不旱 No drought	18~19	68~75	19~20	74~80	13~16	>85	>93	>82	>95
轻旱 Light drought	16~17	60~67	17~18	66~73	17~21	75~85	86~93	73~82	85~95
中旱 Moderate drought	14~15	52~59	15~16	58~65	22~26	65~74	79~85	67~72	70~84
重旱 Severe drought	12~13	45~51	13~14	50~57	27~30	55~64	71~78	60~66	56~69
特旱 Extreme drought	<12	<45	<13	<50	>30	<55	<71	<60	<56

注:土壤绝对湿度=土壤重量含水率,土壤相对湿度=土壤绝对湿度/田间持水量×100。

Note: Soil absolute moisture is mass soil water content, Soil relative moisture = Soil absolute moisture/Field capacity×100.

对于幼苗生物量,W_4在 22%以上,幼苗相对生物量达到 80%以上,幼苗长势好;W_4在 17%以下,相对生物量在 60%以下,长势偏差;W_4在 15%以下,相对生物量 50%以下,幼苗生长缓慢或停滞。

2.4 春旱影响评估

参考 QXT 446—2018《大豆干旱等级》(中国气象局,2018),把大豆春旱划分为 4 个等级(表 1),并根据本试验土壤水分样本,按相对均匀的原则推定不同春旱等级的土壤湿度范围,作为大豆春旱土壤湿度指标。这一春旱土壤湿度指标较已有的作物干旱标准具有一致性,但不旱和特旱的土壤湿度稍大 2 个百分点左右。产生这种偏差的主要原因是干旱时段长短及土层深浅等问题。本研究春旱时期是播种至三真叶期,干旱时段较播种至出苗时段偏长了几天,且考虑 0~20 cm 土层,所以达到同样干旱等级的土壤湿度指标稍大,可见本试验获得的春旱土壤湿度范围指标是客观可信的。考虑到播种至出苗和三真叶前后根层深度差异,用上述 0~10 cm 土层土壤湿度影响方程来估测不同干旱情况下大豆播种至出苗的天数和出苗率,用 0~20 cm 土层土壤湿度影响方程估测不同干旱情况下大豆相对叶龄、相对株高和相对生物量,得到表 1(数字采取 4 舍 5 入原则),重旱和特旱 20 多天后适当补水方可出苗,否则这种严重干旱种子难以出苗,处于“炕种”或芽干状态。

3 讨 论

本文根据田间水分控制试验数据,得到大豆播种—三真叶期间水分胁迫参数和土壤湿度干旱指标。两年的土壤水分控制、出苗期和生物量等都有明显差异,但水分胁迫对出苗及幼苗生长的影响趋势基本一致,采用相对值分析以获得带有普遍意义的水分影响规律。大豆种子发芽出苗前吸水量大于玉米、水稻等粮食作物(崔振才,2003),因此发芽出苗对土壤水分要求更高。本试验证明,土壤水分充沛,大豆出苗块,出苗整齐,植株生长量大,结果符合大豆生理生态特点,也符合作物气象原理(郝兴宇等,2010),研究成果可视为对大豆气象、生态研究的补充和验证。从大豆气象学角度分析土壤水分对苗情的影响,建立大豆出苗时间、出苗率和生物量对

土壤湿度变化的响应模式、参数和定量指标,较已有的基于栽培和作物生理学的试验分析结果有所发展和进步。试验所在区域土壤生态特点、气候变化以及设定的大豆春旱时段长度不同,导致土壤水分指标及影响参数与以往研究结果(Doss *et al.*,1974;沈融等,2011)和相关的标准(中国气象局,2018)有明显差异,表现为每级干旱土壤湿度跨度略小,不旱和特旱的土壤湿度较传统指标大2~3个百分点;所获得的适宜出苗土壤湿度(相对湿度85%左右)也大于前人研究结果(75%左右)(庞艳梅,2008;郝兴宇等;2010),体现了农业气象指标的地域性和阶段性特点。大豆抗旱性与品种有关(赵坤,2010;莫金钢等,2014),本试验仅采用一个耐旱性中等的品种,结果适用于具有同等或相近耐旱性的品种,其他品种的干旱影响参数及干旱指标会有一定差异,可供参考。

本研究显示,东北春大豆播种出苗期间比较喜水,但对土壤干旱也有一定抗御能力,表现在土壤相对湿度60%左右多数种子可以出苗,只是出苗时间明显推迟,幼苗长势较弱;甚至种子处于凋萎湿度附近经受半个月左右的"炕种"而不坏种,获得水分后仍可出苗。试验观察发现,大豆出苗不齐或不出苗的主要原因是种子发芽后持续缺水导致芽干、坏种或芽势偏弱;试验还显示,在水量一定的情况下,少量勤灌不如一次多灌(浇透)更有助于出苗。

本试验结果仍有局限性:一是仅揭示了干旱的影响,缺少涝害处理,水分影响模式和参数显得不够全面;二是缺少干旱时间处理,没有甄别出短期干旱影响;三是对种子发芽状况缺乏细致的观测记录。此外,试验随机误差也会影响结果的稳定性。今后有必要兼顾旱、涝双向影响,开展不同持续时间、不同旱涝程度的水分控制试验,以期获得更完善的水分胁迫模式及旱涝分级指标。

4 结 论

大豆出苗速度、出苗率和幼苗长势与土壤湿度密切相关。播种至出苗期0~10 cm土壤湿度在20%~23%(相对湿度76%~89%)利于大豆种子发芽出苗,播种后9 d左右即可出苗,苗率可达85%以上。土壤湿度低于14%(相对湿度52%)不易出苗。在土壤湿度11%~24%范围内,0~10 cm土壤湿度每提升1个百分点,出苗期提前1~2 d,出苗率提升1.6个百分点。在田间持水量以下,0~20 cm土壤湿度每提升1个百分点,大豆相对叶龄提升6.1个百分点,植株高度增加5.4个百分点,生物量增加10.3个百分点。0~20 cm土壤湿度为21%~24%适宜大豆幼苗生长,相对叶龄和相对生物量可达90%和95%以上,土壤湿度在15%以下(相对湿度58%)很不适合幼苗生长。

按照大豆轻、中、重和特4级春旱划分,0~10 cm土壤绝对湿度依次为16%~17%、14%~15%、12%~13%和12%以下,对应的土壤相对湿度依次为60%~67%、52%~59%、45%~51%和45%以下;0~20 cm土壤绝对湿度依次为17%~18%、15%~16%、13%~14%和13%以下,对应的土壤相对湿度依次为66%~73%、58%~65%、50%~57%和50%以下。

参考文献

崔振才. 2003. 大豆耗水规律与产量和品质关系的研究(硕士学位论文). 哈尔滨: 东北农业大学. [Cui ZC. 2003. Study on relationship between water depletion regulation and yield and quality of soybean (Master's thesis). Harbin: Northeast Agricultural University.]

杜孝敬, 符小文, 安崇霄, 等. 2019. 夏大豆干物质积累参数及产量对膜下滴灌量的响应. 生态学杂志, **38**(6): 1751-1759. [Du XJ, Fu XW, An CX, *et al*. Response of dry matter accumulation parameters and yield of summer soybean to different amounts of drip irrigation under mulch film. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(6): 1751-1759.]

郝兴宇, 韩 雪, 居 煇, 等. 2010. 气候变化对大豆影响的研究进展. 应用生态学报, **21**(10): 2697-2706. [Hao XY, Han X, Ju H, *et al*. 2010. Impact of climatic change on soybean production: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **21**(10): 2697- 2706.]

胡明祥, 于德洋, 孟祥勋, 等. 1990. 不同生态区域环境对中国大豆品质的影响. 大豆科学, **9**(1): 39-49. [Hu MX, Yu DY, Meng XX, *et al*. 1990. The effect of different eco-geographic environment on the seed quality of soybeans on China. *Soybean Science*, **9**(1): 39-49.]

姜丽霞, 李 帅, 李秀芬, 等. 2011. 黑龙江省近三十年气候变化对大豆发育和产量的影响. 大豆科学, **30**(6): 921-926. [Jiang LX, Li S, Li XF, *et al*. 2011. Impacts of climate change on development and yield of soybean over past 30 years in Heilongjiang Province. *Soybean Science*, **30**(6): 921-926.]

江英泽, 董宇辰, 王文佳, 等. 2019. 鼓粒期干旱对春大豆品质和产量的影响. 中国农学通报, **35**(22): 14-18. [Jiang YZ, Dong YC, Wang WJ, *et al*. 2019. Drought affects quality and yield of spring soybean at drum-filling stage. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, **35**(22): 14-18.]

李彩侠, 李 俏, 孙天一, 等. 2014. 气候变化对黑龙江省主

要农作物产量的影响. 自然灾害学报, **23**(6): 200-208. [Li CX, Li Q, Sun TY, *et al*. 2014. Effect of climate change on major crops yield in Heilongjiang Province. *Journal of Natural Disasters*, **23**(6): 200-208.]

李彤霄. 2015. 河南省气候变化对大豆生育期的影响研究. 气象与环境科学, **38**(2): 24-28. [Li TX. 2015. Effect of climate change on soybean growth period in Henan Province. *Meteorological and Environmental Sciences*, **38**(2): 24-28.]

马树庆. 1996. 吉林省农业气候研究. 北京: 气象出版社. [Ma SQ. 1996. Agroclimatic studies in Jilin Province. Beijing: China Meteorological Press.]

莫金钢, 马 建, 张丽辉, 等. 2014. 干旱胁迫对大豆种子萌发的影响. 大豆科学, **33**(5): 701-704. [Mo JG, Ma J, Zhang LH, *et al*. 2014. Effect of drought stress on germination of soybean. *Soybean Science*, **33**(5): 701-704.]

庞艳梅. 2008. 水分胁迫对大豆生长发育、生理生态特征及养分运移的影响(硕士学位论文). 北京: 中国农业科学院. [Pang YM. 2008. Effects of water stress on growth and development, physiological characteristics and nutrient distribution of soybean (Master's thesis). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences.]

邱译萱, 马树庆, 李秀芬. 2018. 吉林春大豆生育期变化及其对气候变暖的响应. 中国农业气象, **39**(11): 715-724. [Qiu YX, Ma SQ, Li XF. 2018. Changes of growth stage for spring soybean in Jilin Province and its response to climate warming. *Chinese Journal of Agrometeorology*, **39**(11): 715-724.]

沈 融, 章建新, 苏广禄, 等. 2011. 不同时期水分亏缺对高产大豆植株地上部分生长的影响. 新疆农业大学学报, **34**(4): 297-301. [Shen R, Zhang JX, Su HL, *et al*. 2011. Effect of water deficit in different period on aerial part growth of high-yield soybean plant. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, **34**(4): 297-301.]

宋梦美, 安萍莉, 江 丽, 等. 2017. 1993—2013 年吉林省主粮作物种植布局及其水热资源利用效率评估. 资源科学, **39**(3): 501-512. [Song MM, An PL, Jiang L, *et al*. 2017. Cultivation patterns of main grain crops and evaluation of water and heat resource utilization efficiency in Jilin Province from 1993 to 2013. *Resources Science*, **39**(3): 501-512.]

王 畅, 赵海东, 冯乃杰, 等. 2018. 两个生态区大豆光热资源利用率和产量的差异及对化控剂的响应. 应用生态学报, **29**(11): 3615-3624. [Wang C, Zhao HD, Feng NJ, *et al*. 2018. Differences in light and heat utilization efficiency and yield of soybean in two ecological zones and their response to chemical control regulators. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **29**(11): 3615-3624.]

王 敏, 杨万明, 侯燕平, 等. 2010. 不同类型大豆花荚期抗旱性形态指标及其综合评价. 核农学报, **24**(1): 154-159. [Wang M, Yang WM, Hou YP, *et al*. 2010. Morphological indexes of drought resistance of soybean accessions and its comprehensive evaluation on flowering and podding stage. *Journal of Nuclear Agricultural Science*, **24**(1): 154-159.]

王兴荣, 张彦军, 李 玥, 等. 2018. 干旱胁迫对大豆生长的影响及抗旱性评价方法与指标筛选. 植物遗传资源学报, **19**(1): 49-56. [Wang XR, Zhang YJ, Li Y, *et al*. 2018. Effects of drought stress on growth and screening methods and indexes for drought-resistance in soybean. *Journal of Plant Genetic Resources*, **19**(1): 49-56.]

薛庆喜. 2013. 中国及东北三省 30 年大豆种植面积、总产、单产变化分析. 中国农学通报, **29**(35): 102-106. [Xue QX. 2013. Analysis on the change of 30 year's soybean areas, production and yield in China and Northeast China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, **29**(35): 102-106.]

赵 坤. 2010. 干旱胁迫条件下春大豆生理生化特性研究(硕士学位论文). 哈尔滨:东北农业大学. [Zhao K. 2010. Research on the physiological and biochemical characteristics of spring soybean under drought stress (Master's thesis). Harbin: Northeast Agricultural University.]

中国气象局. 2018. QX/T 446—2018 大豆干旱等级(中华人民共和国气象行业标准). 北京: 气象出版社. [China Meteorological Administration. 2018. QX/T 446—2018 Grade of soybean drought (Meteorological Industry Standard of the People's Republic of China). Beijing: China Meteorological Press.]

邹京南, 曹 亮, 王梦雪, 等. 2019. 外源褪黑素对干旱胁迫下大豆结荚期光合及生理的影响. 生态学杂志, **38**(9): 2709-2718. [Zou JN, Cao L, Wang MX, *et al*. 2019. Effects of exogenous melatonin on photosynthesis and physiology of soybean during podding stage under drought stress. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(9): 2709-2718.]

Bouslama M, Schapaugh WT. 1984. Stress tolerance in soybean. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop Science*, **24**: 933-937.

David G. 2009. Sensitivity of corn and soybean yield in Illinois to air temperature and precipitation: The potential impact of future climate change. *Physical Geography*, **30**: 27-42.

Doss BD, Pearson RW, Rogers HT. 1974. Effect of soil water stress at various growth stages on soybean yield. *Agronomy Journal*, **66**: 297-299.

Karam F, Masaad R, Sfeir T, *et al*. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, **75**: 226-244.

Kaul M, Hill RL, Walthall C. 2005. Artificial neural networks for corn and soybean yield prediction. *Agricultural Systems*, **85**: 1-18.

Thomas JMG, Boote KJ, Allen LH, *et al*. 2003. Elevated temperature and carbon dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance. *Crop Science*, **43**: 1548-1557.

作者简介 李秀芬,女,1973 年生,硕士,正高级工程师,主要研究方向为生态与农业气象、气候资源及变化研究。E-mail: ge-2003@163.com

责任编辑 李凤芹