



# 黑龙江省大豆生长季适宜气象指标的研究

官丽娟<sup>1,2</sup>, 吴 双<sup>2,3</sup>, 田宝星<sup>1,2</sup>, 王 萍<sup>1,2</sup>, 张志国<sup>1,2</sup>, 李秀芬<sup>1,2</sup>

(1. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省生态气象中心, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘 要:**为研究气候变化背景下黑龙江省大豆生产指标体系, 利用黑龙江省 26 个农业气象站 1981–2016 年的大豆生育期观测资料和同期逐日气象资料, 通过统计方法, 设定概率分布 < 80% 为适宜指标界限, 确定大豆适宜气象指标, 包括根据气候特点和农业气象服务需求划分的 5 个区域和全省大豆关键生育期月适宜气象指标, 采用分期播种试验设计, 探讨大豆发育期气象适宜指标对大豆品种农艺性状和产量的影响。结果表明: 月适宜气温和需水指标月变化趋势相似, 7 月最高, 5 月和 9 月最低, 适宜日照时数指标 5 月最高, 9 月最低; 北部地区月适宜气温指标最低, 西部地区月需水指标最高, 而东部地区月日照指标普遍低于其它地区; 比较大豆各发育阶段适宜指标, 适宜气温指标在结荚期最高, 开花期和鼓粒期次之, 出苗期和成熟期最低; 适宜需水指标在开花期最高, 鼓粒期次之, 出苗期最低; 适宜日照指标在成熟期最高, 开花期次之, 结荚期最低; 分期播种试验表明, 最满足适宜气象指标的播期, 大豆产量最高。

**关键词:**大豆; 生长季; 气象指标; 适宜指标; 生育期

## Optimal Meteorological Indices During the Growing Season of Soybean in Heilongjiang Province

GONG Li-juan<sup>1,2</sup>, WU Shuang<sup>2,3</sup>, TIAN Bao-xing<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-guo<sup>1,2</sup>, LI Xiu-fen<sup>1,2</sup>

(1. Heilongjiang Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China; 2. Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-meteorology in Northeast, China Meteorological Administration, Harbin 150030, China; 3. Heilongjiang Eco-meteorology Center, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to study the index system of soybean production in Heilongjiang province under the background of climate change, we collected the observational information of soybean growth stages of 26 agrometeorological stations in Heilongjiang province from 1981 to 2016, as well as meteorological data in the corresponding period. By the method of standard normal distribution test, the possibility of less than 80% as the bound of optimal indices were designed. 5 regions were classified in Heilongjiang area by the climate characteristics and requirements to the agrometeorological service. The indices contained monthly optimal indices of 5 regions and optimal indices for critical growth stages of soybean. To understand indices for growth stages, an experiment was conducted to evaluate the effect of different sowing date on agronomic traits and yield of soybean. It was concluded that: The changes of monthly optimal temperature and water requirement indices were similar. The indices of monthly optimal temperature and water requirement in July were maximum, and those indices in May and September were minimum. The indices of monthly optimal sunshine hours in May were maximum, and in September were minimum. The indices of monthly optimal temperature were minimum in northern region. The indices of monthly optimal water requirement were maximum in western region. However, the indices of monthly sunshine hours were generally lower than those indices in other regions. Comparison with the indices in different growth stages, the indices of optimal temperature were maximum in podding stage, the next were flowering stage and grain filling stage, and the last were seeding stage and maturing stage. The indices of optimal water requirement were maximum in flowering stage, the following was seed filling stage, and the least was seeding stage. The optimal sunshine hours was the highest at maturing stage, and the lowest at podding stage followed by flowering stage. The results of the experiment indicated that when the meteorological indices of the sowing date accordance with the optimal meteorological indices, the yield of soybean was the highest.

**Keywords:** Soybean; Growing season; Meteorological indices; Optimal indices; Growth stage

黑龙江省是我国重要的非转基因大豆生产基地, 也是东北地区大豆产区的重要组成部分, 2000 年以来黑龙江省大豆播种面积稳定在  $2.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$  以上, 其播种面积仅次于水稻和玉米。2014 年国家

根据国际市场变化, 对大豆种植业给予经济补贴, 科学调整大豆种植结构, 大豆种植面积逐步增加, 至 2016 年黑龙江省大豆种植面积已达到  $3.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(31801253, 31671576); 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(stqx201706); 黑龙江省气象科学局科学技术研究项目(HQZD2017006)。

第一作者简介: 官丽娟(1982–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事气候变化对农业生态影响及评价研究。E-mail: footprint05@126.com。

作物生长季播种至成熟期的气象条件与其产量形成有着十分密切的关系,适宜的气象条件利于生长发育和产量的形成,反之则会抑制生长发育,导致产量形成受损。作物气象指标形成较早<sup>[2-4]</sup>,近年来一些专家采用统计分析或田间试验等方法,开展了针对气象要素对作物生长发育影响的研究。张凯等<sup>[5]</sup>通过温度水分控制试验,得出温度升高和降水减少影响春小麦植株性状、干物质和产量形成;马玉平等<sup>[6]</sup>研究了未来气候变化对玉米产量的影响,指出在玉米品种不变和科技水平保持的前提下,气温升高是玉米减产的主要原因;王彦平等<sup>[7-8]</sup>利用统计方法,认为气温、降水、日照和积温等是影响大豆发育和产量的主要气象因素;孙国伟等<sup>[9]</sup>研究表明播种期和种植密度对大豆产量影响明显;杨显峰等<sup>[10]</sup>总结前人研究成果,根据东北地区大豆生育特性即其对环境的要求确定了适宜大豆生长发育的气象条件;胡惠杰等<sup>[11]</sup>研究了气候变化背景下,东北地区大豆不同生育期内有效降雨量、需水量等,指出大豆全生育期需水量为 328.29 mm;朱海霞等<sup>[12-13]</sup>采用气候适宜度和统计方法,基于气温、降水、日照等,建立了大豆产量动态预报模型。各类研究对气候要素对大豆生长发育的影响机理和产量形成影响分析中助力良多,在农业气象业务中发挥了重要作用。作为很多作物模型和农业气象预报的大豆气象指标参数沿用至今,但受气候变化的影响,黑龙江省主要农业气候资源变化明显<sup>[14-15]</sup>,对作物品种结构、生长发育、产量形成和种植制度等产生了显著影响<sup>[16-17]</sup>,原有的气象指标已不能全面反映气候与作物间的关系。2017 年许佳琦等<sup>[18]</sup>分析了大豆发育期温度降水两个指标,但未就影响大豆生长发育的光温水三要素进行全面系统的研究。在气候变化背景下,气象指标体系需求异常迫切,同时农业气象服务亦对逐月气象指标提出了需求。

近年,作物生理研究和农业气象指标研究常用的方法为分期播种试验或统计方法,分期播种试验是观测不同生育阶段气象要素对作物生物量的影响,进而确定不同生育阶段适宜气象指标<sup>[19-20]</sup>;统计方法是通过建立不同阶段气象要素样本序列,以满足一定概率条件作为作物适宜气象指标<sup>[18,21]</sup>。为研究适用于黑龙江省农业生产和农业气象服务的大豆气象指标体系,本研究利用农业气象站作物观测资料,通过统计方法,研究气候变化背景下大豆生长季适宜气象指标,并利用分期播种试验对不同阶段适宜气象指标进行验证,得出大豆生长季气象指标体系,为黑龙江省大豆生长气象诊断、模型

评估和农业气象服务提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选取 1981 – 2016 年黑龙江省 26 个大豆观测站点发育期数据;1981 – 2016 年黑龙江省 26 个代表站点记录的逐日平均气温、降水量和日照时数;气象资料来源于黑龙江省气象局。

表 1 区域站点分布

| Table 1 Distribution of meteorological stations |   |
|---|---|
| 地区 District                                     | 站点 Station  |
| 北部<br>Northern region                           | 呼玛、爱辉、嫩江、五大连池、嘉荫<br>Huma, Aihui, Nenjiang, Wudalianchi, Jiayin                                      |
| 东部<br>Eastern region                            | 抚远、富锦、汤原、佳木斯、桦南、集贤、饶河、勃利、虎林<br>Fuyuan, Fujin, Tangyuan, Jiamusi, Huanan, Jixian, Raohe, Boli, Hulin |
| 中部<br>Central region                            | 海伦、青冈、庆安、巴彦<br>Hailun, Qinggang, Qing'an, Bayan   |
| 西部<br>Western region                            | 克山、龙江、富裕、拜泉<br>Keshan, Longjiang, Fuyu, Baiquan   |
| 南部<br>Southern region                           | 哈尔滨、双城、宾县、穆棱<br>Harbin, Shuangcheng, Binxian, Muling  |

1.2 试验设计

以每年 5 – 9 月为大豆生长季,生长季内主要发育期为苗期、三真叶期、开花期、结荚期、鼓粒期、成熟期。大豆发育期农业气象指标,根据影响大豆生长发育的相关气象因子确定,包括生育期内气温、降水和日照指标。考虑到黑龙江省东西、南北跨度较大,在分析大豆生长季各月的适宜气象指标时,根据气候特点与地理位置将全省划分为 5 部分:北部、西部、中部、东部和南部(表 1)。

试验于 2015 年在黑龙江省哈尔滨市阿城区新华乡农业气象试验场进行,试验共分 3 个播期,分别为 S<sub>1</sub>(5 月 1 日)、S<sub>2</sub>(5 月 10 日)、S<sub>3</sub>(5 月 21 日),每个播期 2 个重复,其中 S<sub>2</sub> 处理与当地大豆播种期相近,每期播种面积分别为 400,900 和 400 m<sup>2</sup>。供试品种为当地主栽品种黑农 48。播种后无灌溉,各处理防治病虫害和施肥水平等田间管理措施完全一致。按照《农业气象观测规范》进行作物发育期观测,对主要发育期各处理连续取 60 株进行破坏性采样考种,记录大豆植株的生理指标,包括株高、叶面积、株荚数、干物质等,成熟期进行收获考种,分析空秕荚、百粒重、茎秆重、产量等<sup>[22]</sup>。同年的气象资料来自相近气象观测站。由于试验设计中未安排

大豆生长季各月作物长势和生物量等观测,故本文中未对月适宜气象指标做验证。

1.3 方法

1.3.1 气象要素样本序列的构建 按不同区域计算大豆各生育阶段的气象要素指标。首先筛选出种植大豆的年份和站点,然后根据达到某一生育时期的观测日期及日数,选取该时段的气象要素作为统计样本,按照同样的方法筛选出不同区域所有站点所在年份对应该时期的气象数据,以站点个数分母计算该地区的气象要素的平均值,以此建立该区域气象要素的样本序列。

1.3.2 正态分布检验 利用正态分布检验的方法,求取大豆光温指标<sup>[21]</sup>。根据偏度、峰度以及单样本Kolmogorov-Smirnow (K-S) 检验确定样本数据是否呈正态分布,对于不符合正态分布的样本序列,通过坐标转换使其正态化<sup>[23]</sup>。研究中以 80% 的概率作为大豆生长的适宜气温 (T)、适宜需水量 (ET<sub>c</sub>)、适宜日照时数 (S) 的上下限值,计算过程如下:

由检验可知,气象要素样本序列服从正态分布,即随机变量  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < +\infty \quad (1)$$

将样本序列先转化为标准正态分布序列,利用公式(3),即  $X' \sim N(0,1)$

$$X' = \frac{(x-u)}{\sigma} \quad (2)$$

令概率为 80%, 即  $P(|x'| < a) = 0.8, P(|x'| < a) = 2\Phi(a) - 1 = 0.8$ , 其中  $\Phi(a)$  是标准正态分布函数, 则  $\Phi(a) = 0.9$ , 查标准正态分布函数值表,  $a = 1.28$ 。由  $|X'| < 1.28$ , 即  $-1.28 < X' < 1.28$ 。由公式(2) 知,  $x = X'\sigma + u$ , 得出  $-1.28\sigma + u < x <$

$1.28\sigma + u$ , 即  $x$  取得该气象要素的适宜指标上、下限。

1.3.3 适宜需水量计算 大豆生育期需水量 (ET<sub>c</sub>) 的确定采用 FAO 推荐公式<sup>[24]</sup>:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中:ET<sub>c</sub> 为作物需水量 (mm·d<sup>-1</sup>); K<sub>c</sub> 为大豆作物系数<sup>[25]</sup>; ET<sub>0</sub> 为参考作物蒸散量 (mm·d<sup>-1</sup>)。采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算。

2 结果与分析

2.1 月气象适宜指标

2.1.1 适宜气温 黑龙江省 5-9 月为大豆的生长季, 由于地形、气候和生产方式的不同, 各地区月适宜气象指标不同。从表 2 可见, 北部地区月适宜气温指标上、下限低于其它地区 1~3℃, 这与该区代表站点纬度高、平均气温低有关; 西部、中部和东部地区各月适宜气温指标相差不大; 南部地区各月适宜气温指标最高。从各月情况来看, 全省 5 月适宜气温指标为 10~17℃, 6 月气温升高, 适宜指标上升为 16~23℃, 7 月最高达到 20~24℃, 随后各地区适宜气温指标又逐渐降低, 9 月降至 10~17℃ (图 1)。与 1995 年马树庆等<sup>[4]</sup> 分析的吉林省 5-9 月大豆生育期适宜气温相比, 黑龙江省月适宜气温指标下限普遍高于吉林省适宜气温指标的下限, 上限低于其上限, 这与研究区域和气候特点不同有关。与上世纪 90 年代相比, 黑龙江省 2000-2016 年大豆生长季平均气温上升了 0.8℃, 5 月、6 月和 9 月平均气温上升了 1.0~1.3℃, 7 月和 8 月亦上升 0.3~0.4℃。

表 2 各地区大豆月适宜气温指标  
Table 2 Optimal indices of monthly air temperature of soybean in different regions (℃)

| 月份<br>Month | 地区 District     |                |                |                |                 |
|-------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|             | 北部              | 西部             | 中部             | 东部             | 南部              |
|             | Northern region | Western region | Central region | Eastern region | Southern region |
| 5           | 10~15           | 12~16          | 12~16          | 12~16          | 13~17           |
| 6           | 16~21           | 18~23          | 17~23          | 17~22          | 18~23           |
| 7           | 20~23           | 21~24          | 21~24          | 20~24          | 21~24           |
| 8           | 17~21           | 19~22          | 19~22          | 19~23          | 20~23           |
| 9           | 10~14           | 12~16          | 12~16          | 13~16          | 13~17           |

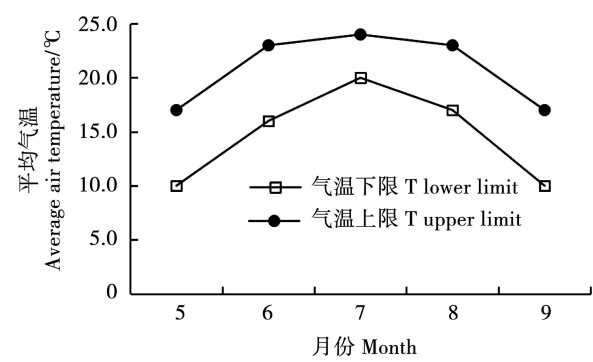


图1 黑龙江省大豆生长季月适宜气温指标  
Fig.1 Optimal indices of monthly air temperature of soybean during the growing season in Heilongjiang province

2.1.2 适宜需水量 黑龙江省大豆生长季平均需水量 (ETc) 为 515 ~ 598 mm,从时间上看,7 月需水最多,达到 158 ~ 196 mm,8 月、6 月次之,5 月和 9 月需水少,这在大豆月适宜需水中亦有体现(图 2)。大豆生长季内理想的降水量,即满足 80% 的情况下(表 3),北部最少,为 538.1 mm,西部最多,为 577.2 mm。各区月适宜需水量差异较大,西部各月适宜指标上下限普遍高于其它地区。从各月情况看,以西

部地区为例,大豆需水指标最小为 9 月的 48 ~ 63 mm,随后是 5 月的 53 ~ 69 mm,7 月需水最多,适宜指标在 158 ~ 206 mm,适宜指标上限和下限变化一致,呈单峰型,其他地区适宜需水指标变化与此类似。马树庆<sup>[4]</sup>的研究指出,吉林省大豆生长季 5 ~ 9 月需水量为 500 ~ 580 mm,从实际情况看,黑龙江省大豆生长季需水量与吉林省相差不大。

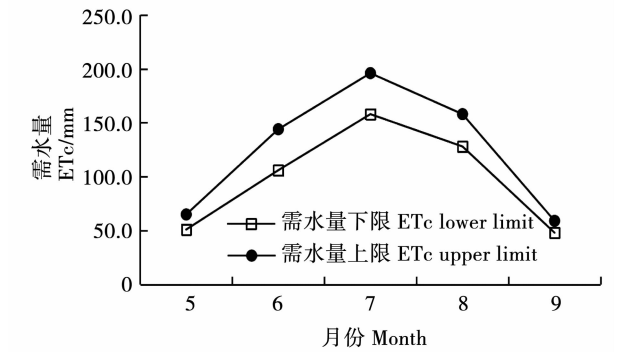


图2 黑龙江省大豆生长季月需水适宜指标  
Fig.2 Optimal indices of monthly ETc of soybean during the growing season in Heilongjiang province

| 月份<br>Month | 地区 District           |                      |                      |                      |                       |
|-------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|             | 北部<br>Northern region | 西部<br>Western region | 中部<br>Central region | 东部<br>Eastern region | 南部<br>Southern region |
|             |                       |                      |                      |                      |                       |
| 5           | 49 ~ 63               | 53 ~ 69              | 52 ~ 69              | 49 ~ 63              | 51 ~ 66               |
| 6           | 103 ~ 143             | 110 ~ 152            | 109 ~ 152            | 99 ~ 141             | 109 ~ 145             |
| 7           | 155 ~ 194             | 158 ~ 206            | 156 ~ 204            | 153 ~ 195            | 158 ~ 199             |
| 8           | 119 ~ 154             | 130 ~ 166            | 129 ~ 160            | 125 ~ 160            | 133 ~ 160             |
| 9           | 42 ~ 55               | 48 ~ 63              | 49 ~ 61              | 48 ~ 60              | 50 ~ 61               |

2.1.3 适宜日照时数 由图 3 可知,大豆生育期平均日照时数1 166.5 h,北部最多,达1 220.0 h,东部最少为1 089.6 h。从各月分布情况看,5 月日照时数最多,此后逐月递减,9 月为大豆生育期日照时数最少的月份,平均为 219.0 h。根据满足 80% 日照时数的要求,得到黑龙江省大豆生长季月日照时数的适宜指标,生长季 5 ~ 9 月总适宜日照时数指标为 1 052 ~ 1 281 h,5 月为 210 ~ 285 h,6 月下限指标为 188 h,上限指标为 299 h,从 7 月开始日照时数下限适宜指标缓慢回升,上限指标缓慢下降,至 9 月,全省平均适宜日照时数指标为 184 ~ 254 h。从各区域来看,东部地区适宜日照时数指标上下限普遍低于其它地区,北部地区上限适宜指标高于其它地区,下限指标除 8 月外,亦比其它地区高或持平(表 4)。

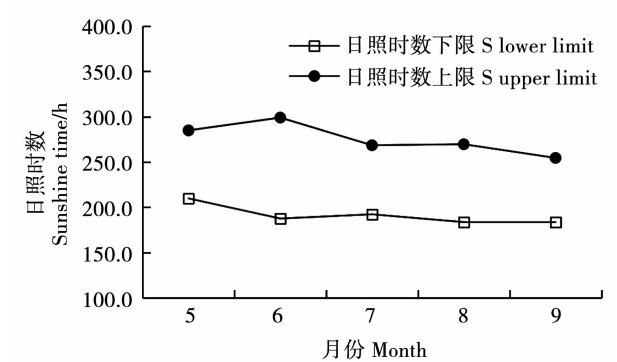


图3 黑龙江省大豆生长季月适宜日照时数指标  
Fig.3 Optimal indices of monthly sunshine hours of soybean during the growing season in Heilongjiang province

表 4 各区域大豆月适宜日照时数指标

Table 4 Optimal indices of monthly sunshine hours of soybean in different regions (h)

| 月份<br>Month | 地区 District     |                |                |                |                 |
|-------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|             | 北部              | 西部             | 中部             | 东部             | 南部              |
|             | Northern region | Western region | Central region | Eastern region | Southern region |
| 5           | 216 ~ 307       | 209 ~ 302      | 217 ~ 299      | 193 ~ 267      | 205 ~ 293       |
| 6           | 181 ~ 339       | 196 ~ 304      | 197 ~ 308      | 159 ~ 290      | 197 ~ 301       |
| 7           | 186 ~ 302       | 184 ~ 288      | 192 ~ 284      | 174 ~ 259      | 194 ~ 268       |
| 8           | 195 ~ 285       | 193 ~ 288      | 188 ~ 281      | 159 ~ 261      | 188 ~ 268       |
| 9           | 176 ~ 258       | 189 ~ 267      | 191 ~ 262      | 168 ~ 250      | 193 ~ 263       |

2.2 生育期适宜气象指标

近 36 年黑龙江省大豆平均生育期从 5 月上中旬开始,9 月中下旬结束,平均长达 133 d。播种期在 5 月上中旬;出苗期在 5 月下旬,15 d;三叶期在 6 月上中旬,13 d;开花期在 7 月上中旬,28 d;结荚期在 7 月下旬至 8 月上旬,18 d;鼓粒期在 8 月中下旬,25 d;成熟期集中在 9 月中下旬,平均 33 d。从各区域来看,北部生育期最短 129 d,南部最长 136 d,西部出苗期 14 d,三真叶期 12 d,时间均短于其它地区,这与当地特殊播种条件有关,西部属于黑龙江省春旱易发区,当地大田种植,普遍采用坐水种的方式播种,使得该地区虽然降水条件不利,但土壤湿度适中,利于作物出苗生长其它生育阶段各地相

差不大;从各生育阶段来看,三叶期时间最短,出苗期次之,成熟期时间最长。

综合各区域的气象条件,得到大豆生育期适宜气象指标,如表 5 所示。大豆生育期适宜气温(T)出苗期为 12 ~ 19℃,此后气温指标逐渐升高,至结荚期为 19 ~ 25℃,此后气温指标逐渐下降;从适宜需水量(ETc)看,开花期和鼓粒期大豆需水量最多,分别为 106 ~ 129 mm 和 97 ~ 129 mm,苗期需水最少,为 24 ~ 36 mm;大豆成熟期适宜日照时数(S)最多,为 203 ~ 322 h,其次是开花期和鼓粒期。开花期和鼓粒期是整个生长季光、温、水所需最多的阶段,即高温、多雨、充足的日照才能有利大豆产量的形成。

表 5 大豆各生育期适宜气象指标

Table 5 Optimal indices of meteorological elements between different soybean growth stages

| 发育期<br>Growth stage       | T/℃         |             | Et <sub>c</sub> /mm |             | S/h         |             |
|---------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
|                           | 下限          | 上限          | 下限                  | 上限          | 下限          | 上限          |
|                           | Lower limit | Upper limit | Lower limit         | Upper limit | Lower limit | Upper limit |
| 苗期<br>Seedling stage      | 12          | 19          | 24                  | 36          | 76          | 204         |
| 三真叶期<br>Three-leaf stage  | 15          | 22          | 30                  | 42          | 64          | 154         |
| 开花期<br>Flowering stage    | 18          | 24          | 106                 | 129         | 154         | 321         |
| 结荚期<br>Podding stage      | 19          | 25          | 79                  | 120         | 75          | 196         |
| 鼓粒期<br>Seed filling stage | 18          | 24          | 97                  | 129         | 127         | 249         |
| 成熟期<br>Maturing stage     | 13          | 19          | 55                  | 69          | 203         | 322         |

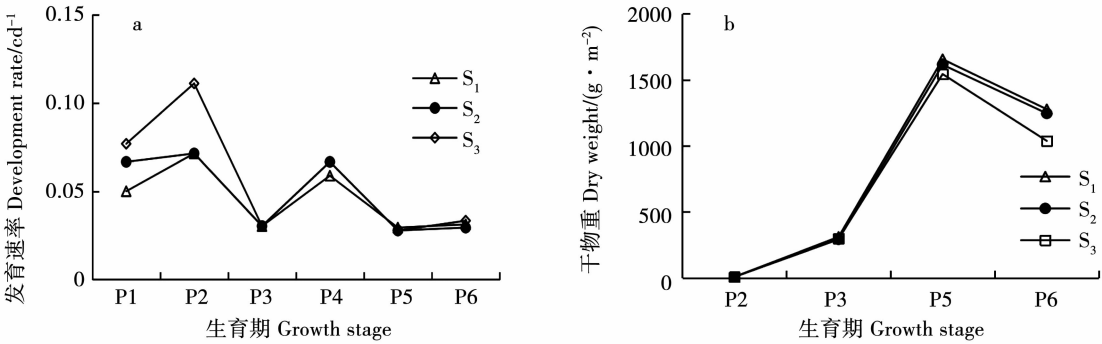
2.3 气象适宜指标验证

大豆生育期各气象指标适宜与否,应以作物获得高产为衡量<sup>[19-20]</sup>,即大豆生育期进程加快,植株长势良好,干物质累积多,产量高。从大豆分期播种试验各发育期光、温、水情况看,S<sub>2</sub> 处理气温和日照时数完全在其适宜指标范围内,出苗和鼓粒期降水量在指标范围内,其余生育期降水量未满足指标

要求;S<sub>1</sub> 处理各生育期降水量和出苗期气温均未在指标范围内;S<sub>3</sub> 处理降水和气温与 S<sub>1</sub> 类似,同时在三真叶和成熟期日照时数未在指标范围,相比较 S<sub>2</sub> 满足光、温、水指标情况明显好于 S<sub>1</sub> 和 S<sub>3</sub>。从不同播期的大豆生长状况看,2015 年大豆的株高没有显著差异(分别为 71,74 和 74 cm),不株茎数存在差异,分别为 46.5,45.3,42.2,表现为:S<sub>1</sub> > S<sub>2</sub> > S<sub>3</sub>。

大豆全生育期日数差异显著,分别为145,142和131 d,各播期各发育期的主要差异集中在大豆营养生长阶段,这从其发育速率上有明显体现。农业气象中,发育速率为完成某一发育阶段所需日数的倒数,可用于反映大豆生育进程的快慢<sup>[20]</sup>。各播期发育速率存在差异主要集中在苗期( $S_3 > S_2 > S_1$ )和三真叶期( $S_3 > S_2 = S_1$ ),大豆进入生殖生长阶段,各播期间发育速率差异变小(图4a)。从叶面积指数上看,三真叶期后各播期叶面积指数存在差异,开花期分别为2.4,2.3,2.0,鼓粒期分别为6.0,4.9,4.6,均表现为 $S_1 > S_2 > S_3$ 。从干物质累积情

况看(图4b),各播期在开花期前差异不明显,在鼓粒和成熟期,干物质累积量 $S_1 > S_2 > S_3$ 。但从干物质分配来看,开花期前茎分配 $S_2 > S_3 > S_1$ ,分别为24.5%、24.2%、23.1%;鼓粒和成熟期茎分配 $S_2 < S_1$ 和 $S_3$ ,分别为26.8%、27.8%、28.5%;成熟期果实分配 $S_2 > S_1 > S_3$ ,分别为70.8%、69.9%、67.9%。可见在大豆营养生长阶段光温水更满足适宜指标的 $S_2$ ,在发育速率、叶面积指数和干物重方面没有表现出明显优势,但大豆进入生殖生长后, $S_2$ 更有利于大豆干物质积累向果实转移,利于产量的形成。



P1: 苗期; P2: 三真叶期; P3: 开花期; P4: 结荚期; P5: 鼓粒期; P6: 成熟期。  
P1: Seeding stage; P2: Three-leaf stage; P3: Flowering stage; P4: Podding stage; P5: Seed filling stage; P6: Maturing stage.

图4 不同播期发育速率(a)和干物重(b)变化

Fig. 4 The change of development rate(a) and dry weight(b) of soybean in different sowing date

由表6可见,产量构成中株荚数 $S_1 > S_2 > S_3$ ,空秕荚率 $S_3 > S_1 > S_2$ ,株结实粒数、百粒重、茎秆重、子粒与茎秆比均为 $S_2$ 最大, $S_1$ 和 $S_3$ 次之。3个播

期的理论产量分别为6 652,6 739和6 422 kg·hm<sup>-2</sup>, $S_2$ 处理的理论产量最大,可见光温水满足适宜指标最好的 $S_2$ 处理更有利于大豆产量的形成。

表6 不同播期的产量构成因素

Table 6 Different treatments on yield and its components

| 播期处理      | 株荚数           | 空秕荚率                   | 株结实粒数                 | 百粒重               | 茎秆重                                | 子粒与茎秆比                |
|-----------|---------------|------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Treatment | Pod per plant | Empty flat pod rate /% | Seed number per plant | 100-seed weight/g | Stem weight/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | Ratio of seed to stem |
| $S_1$     | 44.2          | 1.6                    | 72                    | 20.7              | 4342                               | 1.3                   |
| $S_2$     | 42.3          | 1.2                    | 74                    | 21.9              | 4798                               | 1.4                   |
| $S_3$     | 36.3          | 1.8                    | 65                    | 18.5              | 4113                               | 1.1                   |

3 讨论

本研究设定概率分布 < 80% 为大豆生长季(5-9月)的适宜指标界限,根据黑龙江省地形特点和业务服务需求,分区量化了大豆生长季各月适宜气象指标和全省不同生育期的适宜气温、需水和日照时数指标。其中,大豆月适宜指标可作为预报和评估大豆各月生长状况和气象产量的参考依据,5月和9月的气象指标对各区域大豆播种和收获具有指示作用;分期播种试验表明,更满足适宜气象指标的播期条件下,大豆的农艺性状和产量形成更有利,即本研究的发育期适宜气象指标可预报和评估大豆某一生育期生长状况、判断该阶段内的气候适

宜程度。

将本文得到的大豆生长季气象适宜指标与已有研究指标相比较,从表7可以看出,大豆生长季各月气温适宜指标下限比马树庆<sup>[4]</sup>的研究下限略高,上限比之上限略低,5-9月总需水量与马树庆<sup>[26]</sup>的研究相差不大,但各月需水指标与马树庆<sup>[26]</sup>研究稍有不同。大豆发育期气温适宜指标普遍低于杨显峰等<sup>[10]</sup>,出苗—开花期平均气温下限(15℃)低于许佳琦等<sup>[18]</sup>的指标下限(18℃),节荚—成熟期平均气温适宜指标高于许佳琦等<sup>[18]</sup>的指标,比黄璜<sup>[27]</sup>研究的各发育阶段略高;出苗期和鼓粒期大豆需水适宜指标(24~36 mm,79~129 mm)比杨显峰等<sup>[10]</sup>的指标(20.7~24.7 mm,34.1~56.6 mm)偏

高,开花期和结荚期适宜指标(136 ~ 171 mm,79 ~ 120 mm)比杨显峰<sup>[10]</sup>的研究偏低;与许佳琦等<sup>[18]</sup>的研究相比,本研究的出苗—开花期需水(54 ~ 78 mm)偏少,其它生育阶段偏多。1996 年黄璜<sup>[27]</sup>给出以日照时数达到可照时数 70% 位临界点的日照适宜性指标,将其转化为各阶段总日照时数,即出苗、开花、结荚、鼓粒期分别是 137.8 , 247.6 , 146.5 和 194.7 h,本研究的日照时数适宜指标与之对比,出苗期和开花期(64 ~ 154 h,75 ~ 196 h)的指标偏低,结荚期和鼓粒期(127 ~ 249 h,203 ~ 322 h)的指标偏高。可见,由于作物品种、种植地域、气候特点、样本数量和研究方式等不同,大豆生长季的适宜气象指标不尽相同,每种指标适应的地域和品种均不同,根据黑龙江省气候特点和大豆生长发育规律,得到的生长季各月和发育期的适宜气象指标具有更强的针对性,可以更好地应用于农业气象服务,指示大豆生产。

## 4 结 论

在全球气候变化的背景下,大豆种植界限、品种熟型和种植制度等发生了显著的变化,虽受经济因素影响,大豆种植面积出现一度减少的情况,但其单位产量的增加已成事实,这与农业技术提高密切相关,同时也是大豆生长对外界环境的自适应过程。因此,在原有研究基础上,继续大豆生长季适宜气象指标的研究很有必要。本文基于大豆生长发育与气象要素观测事实,统计分析农业气象指标,月气温、需水和日照时数适宜指标以及包括三真叶期在内的发育期适宜气象指标,更符合大豆生产和农业气象服务的实际情况,对黑龙江省不同地区大豆生产具有指导意义,并可为黑龙江省大豆生长气象诊断、预测和评估提供参考依据。

## 参考文献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>. (National Bureau of statistics. China statistical year-book [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj>.)

[2] 祖世亨,石剑,祖雪梅. 黑龙江省旱涝灾害农业气候指标及地理分布区划[J]. 自然灾害学报,1996,5(3):116-122. (Zu S H, Shi J, Zu X M. The agroclimatic index and area distribution on drought and flood in Heilongjiang province [J]. Journal of Natural Disasters 1996, 5(3): 116-122.)

[3] 冯定原,邱新发. 农业干旱的成因、指标、时空分布和防旱抗旱对策[J]. 中国减灾,1995,5(1):22-26. (Feng D Y, Qiu X F. Cause, indexes, spatiotemporal distribution and countermeasures of drought [J]. Disaster Reduction in China, 1995, 5(1): 22-26.)

[4] 马树庆. 我省发展大豆生产的农业气候条件及生产区划分

[J]. 吉林气象,1995(1):16-19. (Ma S Q. Agricultural climatic conditions and division of development of soybean production in our province [J]. Jilin Qixiang, 1995(1): 16-19.)

[5] 张凯,王润云,王鹤龄,等. 温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响[J]. 中国生态农业学报,2018,DOI:10.13930/j.cnki.cjea.171014. (Zhang K, Wang R Y, Wang H L, et al. Interactive effects of temperature increase and rainfall decrease on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171014.)

[6] 马玉平,孙琳丽,俄有浩,等. 预测未来 40 年气候变化对我国玉米产量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(1):224-232. (Ma Y P, Sun L L, E Y H, et al. Predicting the impact of climate change in the next 40 years on the yield of maize in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 224-232.)

[7] 王彦平,阴秀霞,侯琼,等. 大兴安岭东部近 30 年气候变化对玉米、大豆生长发育的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(4):326-330,327. (Wang Y P, Yin X X, Hou Q, et al. Influence of climate change on corn and soybean in eastern Da Hinggan Mountains over the last 30 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 326-330, 327.)

[8] 范元芳,杨畅,王锐,等. 弱光对大豆生长、光合特性及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2016,38(1):71-76. (Fan Y F, Yang C, Wang R, et al. Effects of low light on growth, photosynthetic characteristics and yield of soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2016, 38(1):71-76.)

[9] 孙国伟,付连舜,张凤路,等. 播期及密度对不同大豆品种农艺性状及产量的影响[J]. 大豆科学,2016,35(3):423-427. (Sun G W, Fu L S, Zhang F L, et al. Effects of sowing date and plant density on agronomic traits and yield for different soybean [J]. Soybean Science, 2016, 35(3): 423-427.)

[10] 杨显峰,杨德光. 东北春大豆气候适宜性指标体系的建立初步研究[J]. 种子世界,2009(11):36-38. (Yang X F, Yang D G. Preliminary studies on establishing climatic adaptability index system for spring soybean in Northeast China [J]. Seed World, 2009 (11): 36-38.)

[11] 胡惠杰,王猛,尹小刚,等. 气候变化下东北农作物区大豆需水量时空变化特征分析[J]. 中国农业大学学报,2017,22(2):21-31. (Hu H J, Wang M, Yin X G, et al. Spatial and temporal changes of soybean water requirement under climate changes in the Northeast farming region of China [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(2): 21-31.)

[12] 朱海霞,赵慧颖,李秀芬,等. 黑龙江省大豆主产地产量动态预报系统的建立[J]. 大豆科学,2017,36(6):950-957. (Zhu H X, Zhao H Y, Li X F, et al. System development of dynamic forecast on soybean yield of main areas in Heilongjiang province[J]. Soybean Science, 2017, 36(6):950-957.)

[13] 邱美娟,郭春明,王冬妮,等. 基于气候适宜度指数的吉林省大豆单产动态预报研究[J]. 大豆科学,2018,37(3):445-451. (Qiu M J, Guo C M, Wang D N, et al. Study of soybean yield forecast in Jilin province based on climate suitability index method [J]. Soybean Science, 2018, 37(3):445-451.)

[14] 杜春英,宫丽娟,张志国,等. 黑龙江省热量资源变化及其对作物生产的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(2):242-252.

(Du C Y, Gong L J, Zhang Z G, et al. Characteristics and effects on crop production of heat resources changes in Heilongjiang province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 242-252. )

[15] 冯喜媛,王宁,刘实. 1961-2014 年东北三省热量资源变化特征[J]. 气象与环境学报,2018,34(1):91-98. (Feng X Y, Wang N, Liu S. Variation characteristics of thermal resources over the three northern provinces in China from 1961 to 2014[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(1): 91-98. )

[16] 姜丽霞,李帅,李秀芬,等. 黑龙江省近 30 年气候变化对大豆发育和产量的影响[J]. 大豆科学,2011,30(6):921-926. (Jiang L X, Li S, Li X F, et al. Impacts of climate change on development and yield of soybean over past 30 years in Heilongjiang province [J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 921-926. )

[17] 曲辉辉,朱海霞,王秋京,等. 气候变化对东北大豆生育期和产量的影响模拟[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014,42(7):61-69. (Qu H H, Zhu H X, Wang Q J, et al. Effects of climate change on soybean growth period and yield in Northern China[J]. Journal of Northern A & F University (Natural Science Edition), 2014, 42(7): 61-69. )

[18] 许佳琦,郭立峰,殷世平,等. 黑龙江省大豆不同生育阶段适宜温度与降水量化指标研究部[J]. 东北农业大学学报,2017,48(8):33-44. (Xu J Q, Guo L F, Yin S P, et al. Study on suitable temperature and precipitation quantification indexes in different soybean growth periods in Heilongjiang province [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017,48(8):33-44. )

[19] 王琪,马树庆,郭建平,等. 温度对玉米生长和产量的影响[J]. 生态学杂志,2009,28(2):255-260. (Wang Q, Ma S Q, Guo J P, et al. Effects of air temperature on maize growth and yield [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(2):255-260. )

[20] 武荣盛,吴瑞芬,侯琼,等. 内蒙古河套灌区春玉米苗期光温指标[J]. 应用生态学报,2015,26(1):241-248. (Wu R S, Wu R F, Hou Q, et al. Light and temperature indices during the seeding stage of spring maize in Hetao irrigation district, Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 241-248. )

[21] 李树岩,刘荣花,成林,等. 冬小麦生长适宜光温指标研究[J]. 河南农业大学学报,2012,46(5):498-505. (Li S Y, Liu R H, Cheng L, et al. Study on suitable indexes of light and temperature for winter wheat growth[J]. Journal of Henna Agricultural University, 2012, 46(5):498-505. )

[22] 中国气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 1993. (China Meteorological Administration. Specifications for agrometeorological observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993. )

[23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:34-35. (Wei F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: Meteorological Press, 1999:34-35. )

[24] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[C]// FAO Irrigation and Drainage. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Union, 1998:56.

[25] 李秀芬,朱海霞,宫丽娟,等. 黑龙江省寒地大豆气候适宜度演变特征[J]. 中国农学通报,2018,34(28):93-100. (Li X F, Zhu H X, Gong L J, et al. The evolution characteristics of climatic suitability of cold land soybean in Heilongjiang province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(28): 93-100. )

[26] 马树庆. 气候变化对东北区粮食产量的影响及其适应性对策[J]. 气象学报,1996,54(4):484-492. (Ma S Q. A simulating study on the influences of climate change on grain yield and the countermeasures in the northeast China [J]. Acta Meteorological Sinica, 1996, 54(4):484-492. )

[27] 黄璜. 中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究[J]. 自然资源学报,1996,11(4):340-346. (Huang H. A study on the climatic ecology adaptability of the crop production in the red and yellow soils region of China [J]. Journal of Natural Resources, 1996, 11(4): 340-346. )