

黑龙江省大豆作物系数的确定

杨晓娟, 刘园, 白薇, 刘布春

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/作物高效用水与抗灾减损国家工程实验室/
农业部农业环境重点实验室, 北京 100081)

摘要: 作物系数是计算作物需水量, 合理进行灌溉和水分资源调配的重要参数。依据 1991—2011 年黑龙江 10 个典型农业气象站大豆农业气象观测记录, 运用统计学方法, 确定了大豆实际平均生育期, 利用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式和根层水分平衡原理, 计算出了大豆作物系数, 并进一步分析了大豆作物系数的变化规律。结果表明, 近 20 年, 黑龙江大豆平均播种时间推迟 5 d, 收获时间推迟 10 d, 平均生育期为 5 月 1 日到 9 月 30 日, 生育期延长 5 d。大豆作物系数在生育期内呈现出“单峰”变化趋势, 结荚期的作物系数最大, 为 0.96, 其次是开花期, 为 0.75, 苗期和成熟期最小, 为 0.32; 三叶期、分枝期和鼓粒期作物系数分别为 0.60, 0.62 和 0.71, 全生育期平均作物系数为 0.61。大豆的水分敏感期为结荚期和开花期。

关键词: 大豆; 作物系数; 生育期; 作物系数变化规律; Penman - Monteith 公式; 根层水分平衡法; 黑龙江省
中图分类号: S565.1; S274.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0053-04

Estimation of crop coefficients for soybean in Heilongjiang province

YANG Xiao-juan, LIU Yuan, BAI Wei, LIU Bu-chun

(*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science/National Engineering Laboratory of Efficient Water Use, Disaster Resistant and Mitigation of Crops/Key Laboratory of Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*)

Abstract: Crop coefficient is an important parameter for calculating crop water requirements and reasonable distribution of irrigation water and water resources. According to the observed records from 1991 to 2011 in 10 typical agricultural meteorological stations of Heilongjiang province, the average soybean growth stages were determined by using the statistical method, the crop coefficients of soybean were estimated by using the FAO recommended Penman - Monteith Formula and water balance equation in root zone, and the variable rule of crop coefficient of soybean was further analyzed. The results indicated that: In recent 20 years, the sowing date of soybean was delayed average 5 days, the harvest date was delayed 10 days, and the average soybean growing season was from first day of May to last day of September. The soybean crop coefficient displayed unimodal distribution in whole growing season. The average crop coefficient in whole growing season was 0.61, the highest value was 0.96 at podding stage, the second was 0.75 at flowering stage, the lowest value was 0.32 at seedling and maturing stages. The crop coefficients in three leaves stage, branching stage and podding stage were 0.60, 0.62 and 0.71, respectively. The water sensitive period was podding stage and flowering stage.

Keywords: soybean; crop coefficient; growth stage; variable rule of crop coefficient; Penman - Monteith Formula; water balance equation in root zone; Heilongjiang province

黑龙江省是我国大豆的主产区, 播种面积和产量均占全国的 30% ~ 40%, 出口高达 80% 左右。近年来, 随着气候变化, 旱灾已经成为制约大豆生产的

主要因素之一。为了合理灌溉, 提高水资源利用, 需要通过作物系数确定大豆的需水量。作物系数是某种作物的潜在蒸散量与参照蒸散量之比, 它反映不

收稿日期: 2014-05-14

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项“主要农作物抗御季节性干旱技术与示范”(201203031); 国家级公益性科研院所基本科研业务费“东北地区主要作物天气指数保险和风险区划研究”(BSRF201102)

作者简介: 杨晓娟(1980—), 女, 陕西岐山人, 助理研究员, 博士, 研究方向为农业灾害损失评估与风险管理。E-mail: yangxiaojuan@caas.cn。

通信作者: 刘布春(1968—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事农业减灾和农业灾害风险管理研究。E-mail: liubuchun@caas.cn。

同作物与参照作物的区别,是根据参照蒸散量计算实际作物需水量的重要参数^[1]。作物系数受土壤、气候、作物生长状况和管理方式等多种因素影响^[1-2]。20 世纪 80 年代,我国开展全国主要农作物需水量等值线图的协作研究,应用水量平衡原理采用坑测法测定小麦、玉米、水稻等粮食作物和经济作物的系数,提出了这些作物在各地区不同生长时期的作物系数。对没有试验资料或试验资料不足的作物和地区,利用 FAO 推荐的 84 种作物的标准作物系数和修正公式进行修正^[3],或者利用土壤、气象、灌溉、径流、农作物发育参数等观测数计算出作物潜在蒸散量和参考蒸散量,其比值确定为作物系数。李晶、纪瑞鹏等^[4-5]利用此方法计算了东北地区辽宁玉米的作物系数,结果与实际情况比较相符。利用以上几种方法,已有不少学者对农作物的作物系数做了研究^[4-6],关于黑龙江大豆的作物系数,只有少量的盆栽试验研究^[7-8],而且结果相去甚远。因此本研究的目的是通过已有的气象、土壤、灌溉、大豆发育参数等数据资料计算东北地区黑龙江省大豆的作物系数,为节水灌溉和水资源优化管理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究地点及资料来源

黑龙江省位于欧亚大陆东部,太平洋西岸,气温为温带大陆季风气候,平均气温在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$,无霜冻期 100 ~ 150 d,平均年降水量 400 ~ 650 mm,生长季内降水约为全年的 83% ~ 94%,年日照时数多在 2 400 ~ 2 800 h。本研究采用了 1991—2011 年黑龙江省 10 个农业气象站点的数据,资料来源于黑龙江省气象档案资料馆,其典型台站的位置和基本信息见表 1。

1.2 大豆生育期确定

收集黑龙江省典型农业气象站近 20 年(1991—2011)的大豆生育期数据,根据公式(1)计算大豆多年平均生育期。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij}}{nm} \quad (1)$$

式中, \bar{X} 为多年生育期的平均值; X_{ij} 为统计时间内每年生育期; m 为统计的时间尺度; n 为典型农业气象台站的数量。

1.3 大豆作物系数计算

大豆的作物系数为大豆最大蒸散量与参照作物蒸散量的比值,即

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (2)$$

表 1 黑龙江省农业气象典型台站信息(1991—2011)

Table 1 Information for typical agricultural meteorological stations in Heilongjiang province(1991—2011)

典型台站 Typical station	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude
黑河 Heihe	127°27'E	50°15'N	166.4
富裕 Fuyu	124°29'E	47°48'N	162.7
哈尔滨 Ha'erbin	126°46'E	45°45'N	142.3
绥化 Suihua	126°58'E	46°37'N	179.6
鸡西 Jixi	130°56'E	45°18'N	280.8
伊春 Yichun	128°55'E	47°44'N	240.9
佳木斯 Jiamusi	130°17'E	46°49'N	81.2
富锦 Fujin	131°59'E	47°14'N	66.4
宝清 Baoqing	132°11'E	46°19'N	83.0
虎林 Hulin	132°58'E	45°46'N	100.2

1.3.1 参考作物蒸散量计算 参考作物蒸散量采用联合国粮农组织推荐的 Penman - Monteith 公式计算^[1],即

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_d - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 是作物潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 是饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_n 是作物冠层表面净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 是土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 是日平均气温($^{\circ}\text{C}$); U_2 是 2 m 高度处风速($\text{m} \cdot \text{S}^{-1}$); e_d 是饱和水汽压(kPa); e_a 是实际水汽压(kPa); γ 是干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

1.3.2 大豆最大蒸散量的计算 根据大豆生育期内土壤水分实际观测资料,利用根层水量平衡原理,计算大豆田间实际蒸散量。根层水量平衡方程为:

$$ET_c = R + I - J - D - \Delta W \quad (4)$$

式中, R 为同时段的降水量(mm); I 为同时段的灌溉量(mm); J 为同时段的地表径流(mm); D 为同时段的深层渗透量(mm); ΔW 为同时段开始与结束时根层土壤含水量的变化(mm),其计算方法如下:

$$\Delta W = \frac{h \times d \times \theta}{10} \quad (5)$$

式中, h 是土壤厚度(cm); d 是土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); θ 是土壤重量含水量。

在式(5)中,选取大豆根层既无重力水,又没有达到毛管断裂水的土壤湿度为分析样本,即介于土壤田间持水量和凋萎湿度之间的样本。

本研究中,以旬为研究时间段,从 5 月上旬至 9 月下旬,覆盖大豆全生育期,最大土壤湿度观测深度为 $h = 50 \text{ cm}$,每隔 10 cm 为 1 个土壤湿度观测层。

2 结果与分析

2.1 黑龙江大豆生育期

从图 1 可以看出,近 20 年来,黑龙江大豆平均生育期从 5 月上旬开始,到 9 月下旬结束,长达 150 d。播种期 20 d,在 5 月上旬和中旬;出苗期 10 d,在 5 月下旬;三叶期 20 d,在 6 月上中旬;分枝期 10 d,在 6 月下旬;开花期 20 d,在 7 月上中旬;结荚期 30 d,在 7 月下旬和 8 月上中旬;鼓粒期 30 d,在 8 月下旬和 9 月上中旬;成熟期 10 d,在 9 月下旬。大豆播种出苗期,黑龙江十年九春旱,干旱会影响大豆的播种,另外低温冷害也是影响大豆播种出苗的重要原因之一。三叶期到鼓粒期是大豆的快速生长期和生长中期,需水量很大,而黑龙江的降雨主要集中在夏

季,能有效地为大豆生长提供水分。但近年来夏旱频繁发生,严重影响了大豆的生长。成熟期基本不需要水分,尽管黑龙江的秋旱也有发生,但对大豆的生长基本不造成影响。

2.2 大豆作物系数

由图 2 可见,大豆在生育期内,作物系数的变化规律是前期小,中期大,后期又变小,呈现出明显的“单峰”变化趋势,这与大豆初始生育期、快速生育期、生育中期和成熟期的生理变化过程一致。生长初期,作物系数比较小,随着大豆的出苗,冠层的进一步发育,蒸腾占作物日耗水量逐渐增加,作物系数随之增大,到 8 月上旬大豆的冠层完全发育成熟,其作物系数也上升到最大值 1.06。之后,大豆叶片开始衰老,呼吸作用减弱,作物系数也开始降低,直到 9 月下旬达到 0.32。

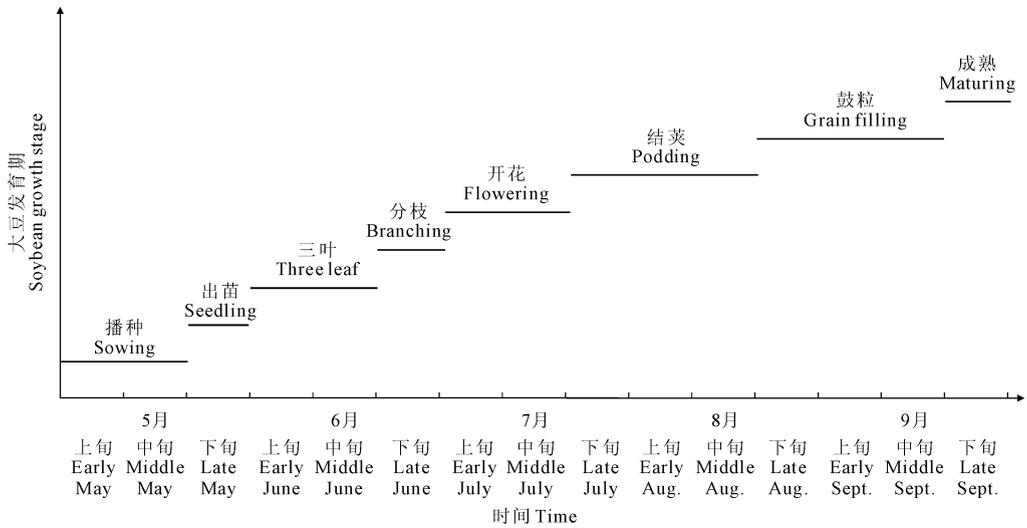


图 1 黑龙江大豆发育期

Fig.1 Soybean growth stages in Heilongjiang province

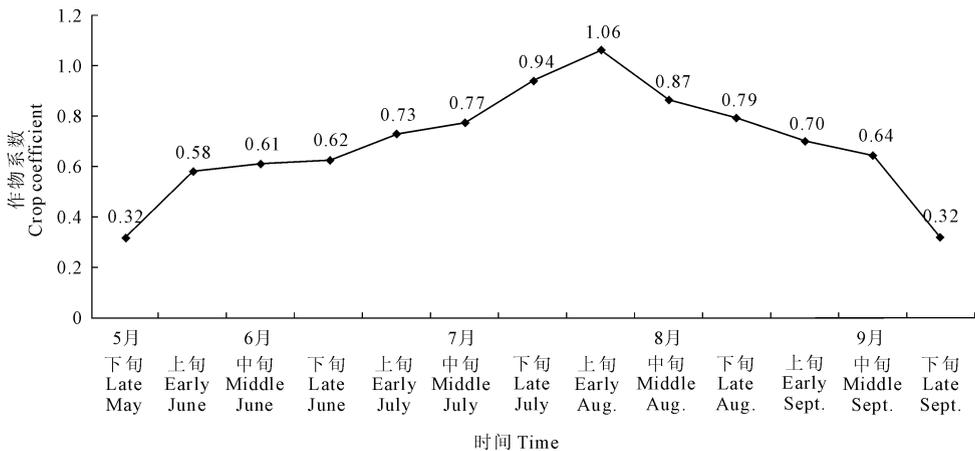


图 2 黑龙江大豆作物系数变化曲线

Fig.2 Variation curve of soybean crop coefficient in Heilongjiang province

根据大豆发育期的划分和作物系数的旬值,计算出大豆各发育期的作物系数。从表 2 中可以看出,结荚期的作物系数最大,为 0.96,其次是开花期,为 0.75。从各发育阶段的作物系数来看,大豆的水分敏感期首先为结荚期,其次是开花期,这和前

人的研究结果基本一致^[6]。尽管黑龙江的雨季在七八月份,但是夏旱也时有发生,这个时候正是大豆的水分敏感期,对大豆生长造成严重的影响。做好大豆水分敏感期的水分管理能有效的保障大豆的质量和产量。

表 2 黑龙江大豆各发育期作物系数

Table 2 Crop coefficient of soybean in each growth stage in Heilongjiang

发育期 Growth stage	苗期 Seedling	三叶期 Trefoil	分枝期 Branching	开花期 Flowering	结荚期 Podding	鼓粒期 Grain filling	成熟期 Maturing	全生育期 Growing season
K_c	0.32	0.60	0.62	0.75	0.96	0.71	0.32	0.61

3 结论与讨论

近 20 年,黑龙江大豆平均生育期为 5 月 1 日到 9 月 30 日,大豆作物系数在生育期内呈现出“单峰”变化趋势,结荚期作物系数达到最大值 0.96,其次是开花期 0.75,苗期和成熟期为最小值 0.32;三叶期、分枝期和鼓粒期的作物系数分别为 0.60, 0.62 和 0.71,全生育期平均作物系数为 0.61。大豆的水分敏感期为结荚期和开花期。

黑龙江省大豆适宜播种期:中南部地区为 4 月 25 日至 5 月 10 日,北部和东部地区为 5 月 5 日—15 日。但经常由于低温冷害等自然条件不适宜,播期往往会推迟。《中国主要农作物需水量等值线图研究》^[9]指出,黑龙江大豆生育期是 4 月 25 日到 9 月 20 日。本研究结果表明,黑龙江省大豆播期在 5 月 1 日—20 日,生育期为 5 月 1 日到 9 月 30 日。大豆生育期的推迟原因可能是近 20 年来,随着全球气候变化,极端事件发生频率增加,黑龙江地区大豆播种期的干旱和低温冷害发生概率增加,导致了大豆播种期推迟。

本研究得出的黑龙江大豆作物系数生育期内的“单峰”变化趋势,与前人的研究结果一致,但具体数值有所差异^[6-11]。气象条件、耕种措施、土壤类型、水分管理方式、生长季节等因素会显著影响作物系数^[1-2,10-12];不同作物系数计算方法(单作物系数和双作物系数)和不同蒸散量计算方法(利用蒸渗仪等仪器的直接测定法和利用气象等数据进行数学模拟的间接算法)获得的作物系数也会有差异^[11,13-14]。因此,作物系数具有不可移用性,蒸散量测定仪和模型的发展,数据获取量的增加会提高作物系数的精确性。

参考文献:

[1] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-

guidelines for computing crop water requirement - FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO), 1998.

- [2] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. *Agricultural Water Management*, 2011,98:899-920.
- [3] 刘 钰,汪 林,倪光恒,等.中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J].*农业工程学报*,2009,25(12):6-12.
- [4] 李 晶,张运福,班显秀.辽宁玉米作物系数研究[J].*辽宁气象*,2001,(1):18-20.
- [5] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰.辽宁地区玉米作物系数的确定[J].*中国农学通报*,2004,20(3):246-248.
- [6] 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,(3):19-22.
- [7] 赵云山,同学斌.黑龙江省半干旱区灌溉试验下不同氮肥条件下大豆作物系数的试验研究[J].*黑龙江科技信息*,2009,30:24.
- [8] 王 柏,郭亚芬,魏光霞,等.黑龙江省西部半干旱区大都作物系数的试验研究[J].*灌溉排水学报*,2007,26(4):53-54.
- [9] 陈玉民,郭国双.中国主要农作物需水量等值线图研究[M].北京:中国农业科技出版社,1993.
- [10] Odhiambo L O, Irmak S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 221-234.
- [11] Payero, J O, Irmak S. Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coefficient of soybean [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 129:31-43.
- [12] Kang Shaozhong, Gu Binjie, Du Taisheng, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2003,59(3):239-254.
- [13] Zhang Baozhong, Liu Yu, Xu Di, et al. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 2013,31(6):1303-1316.
- [14] Li Sien, Kang Shaozhong, Li Fusheng, et al. Evapotranspiration and crop coefficient of spring maize with plastic mulch using eddy covariance in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95:1214-1222.