

内蒙古东北部大豆灌溉动态预报模型

武荣盛,吴瑞芬,孙小龙,金林雪,李 丹,侯 琼

(内蒙古自治区气象局生态与农业气象中心,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要:为实现内蒙古东北部大豆农田灌溉动态预报,应用多项式拟合方法将大豆适宜土壤湿度下限值插值到全生育期的每一天,形成适宜土壤水分下限动态连续指标曲线,并从土壤-作物-大气连续体角度出发,依据农田土壤水分平衡理论,利用内蒙古突泉农业气象试验站 2001—2007 年土壤水分数据和气象资料,建立了适合内蒙古东北部旱作农区的大豆灌溉动态预报模型,实现了灌溉日期和灌溉量的时域滚动预报;利用 2008—2011 年实测数据验证该模型模拟结果,土壤相对湿度预测值与实测值的均方根误差(RMSE)和平均绝对百分比误差(MAPE)分别为 2.44%和 3.42%,预报灌溉日期的误差在-3~3 d 之间,表明模型准确性和实用性较强,可为东北大豆产区节水灌溉提供一定的科学依据。

关键词:大豆;灌溉;动态指标;预报模型;内蒙古东北部

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

An dynamic irrigation prediction model for soybean in northeast of Inner Mongolia

WU Rong-sheng, WU Rui-fen, SUN Xiao-long, JIN Lin-xue, LI Dan, HOU Qiong

(Inner Mongolia Ecological and Agricultural Meteorological Center, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China)

Abstract: In order to realize the dynamics irrigation prediction for the soybean in northeast of Inner Mongolia, the polynomial fitting method was applied to interpolate the suitable soil moisture lower limit value for each day in whole soybean growth period, to form the dynamic index curve for the suitable soil moisture index lower limit. Started from the point of view of soil-plant-atmosphere continuum, based on the theory of soil water balance, using the soil moisture data and meteorological information from 2001 to 2007 of agricultural meteorological station in Tuquan County of Inner Mongolia, was set up the dynamic irrigation forecasting model for soybean that was suitable to the dry farming area in northeast of Inner Mongolia, to realize the time domain rolling forecast for the irrigation date and irrigating. The model simulated results were verified by the observed data from 2008 to 2011. The root mean square error(RMSE) and the mean absolute percentage error(MAPE) between the predictive and measured values of relative soil moisture were 2.44% and 3.42%, respectively. The error between the forecasting and actual irrigation date was within ± 3 days. It indicated that accuracy and practicability of the model were rather strong. The research results can be provided certain scientific basis for developing water saving irrigation in soybean producing area of Northeast China.

Keywords: soybean; irrigation; dynamic index; prediction model; northeast of Inner Mongolia

干旱一直是制约内蒙古地区农业发展的主要因素,自然降水不足或与作物需求匹配不均是造成农业干旱的原因,生产者对干旱的应对能力不足则是导致旱灾的原因。因此,农田灌溉动态预报成为抵御农业干旱的有效手段和节水灌溉研究的重要内容之一。

内蒙古东北部是全国大豆主要生产区之一,面积和产量分别占全自治区的 86% 和 90%。东北大

豆种植区旱作农田占较大比重,灌溉条件有限,水资源短缺和干旱多发性一直是阻碍这一地区农业生产持续发展的主要因素^[1]。此外,由于农业生产管理的科学性较差,导致农业用水浪费现象非常严重,因此构建和优化农田灌溉动态预报模型,提高灌溉水利用率,可为东北缺水地区农田灌溉管理与科学决策提供依据和可行方案,对于普及和推广节水型的灌溉农业起到较大的推动作用^[2]。

收稿日期:2014-06-30
基金项目:内蒙古自治区农业科技成果转化资金项目“内蒙古农田节水灌溉气象预报技术推广应用”(2012GB24160610)
作者简介:武荣盛(1984—),男,内蒙古乌海人,工程师,硕士,主要从事农业气象应用和研究。E-mail:rocky_wrs@163.com。
通信作者:吴瑞芬,E-mail:wu_ruifen@126.com。

近年来,国内很多学者对农田灌溉模型和管理方法做了大量的研究工作。马建琴等^[3]建立了区域农业水资源可持续利用多目标综合优化管理模型。侯琼等^[4]在土壤水分平衡理论的基础上,建立了内蒙古春小麦和春玉米灌溉日期预报方法。张红亚等^[5]运用动态规划法研究了供水不足条件下非充分灌溉制度,得到了冬小麦和夏玉米等作物的优化灌溉制度。张兵等^[6]建立了适合中国国情的基于灌水收益最大的多作物多约束非线性优化灌溉模型,应用遗传算法的搜寻功能,解决了玉米和小麦联合种植的优化灌溉问题。虽然多年的研究取得了很多宝贵的成果,但均存在一定的区域性限制,直接移植应用较受局限,而且大多都是对玉米和小麦等主要粮食作物的研究,针对大豆建立的灌溉模型报道较少,此外采用的土壤水分指标以时段静态指标为主,缺少全生育期动态连续指标。本文应用多项式拟合技术将适宜土壤水分下限值插值到大豆全生育期的每一天,形成适宜土壤水分下限动态连续指标曲线,并利用内蒙古东北部突泉农业气象试验站的基本气象资料和土壤水分数据,基于农田土壤水分平衡理论,结合大豆生长发育规律,建立适合内蒙古东北部旱作农区的大豆灌溉动态预报模型,实现时域滚动预报灌溉日期和灌溉量,旨在为东北大豆主产区发展节水农业提供科学依据。

1 灌溉预报模型的建立

灌溉预报模型从土壤—作物—大气连续体角度出发,在综合考虑气象、作物和土壤三方面相互作用的基础上,实现对农田土壤湿度的滚动预测,并结合大豆不同生育期灌溉指标和根系生长规律,对灌溉日期和灌溉量进行预报。

1.1 灌溉指标的确定

作物不同生育阶段有不同的土壤水分适宜范围,多年来,很多科研工作者对大豆各生育期土壤水分与生长量和产量要素等的关系做了较深入的研究。庞士铨等^[7]研究表明,在大豆苗期和鼓粒结荚期,土壤相对湿度为 50% 即可满足生长发育基本需要,而开花期需水较多,土壤相对湿度为 75% 的产量高于 50% 的产量。韩晓增等^[8]认为大豆营养生长期、花期、荚期和鼓粒期在 100% 和 70% 的土壤相对湿度下产量较高,而且非常接近。沈融等^[9]研究表明,大豆开花和结荚期在 70% 土壤相对湿度下的水分利用效率高于其它处理(土壤相对湿度分别为 80%, 70%, 60%, 50%)。由剑波等^[10]认为大豆出苗后土壤水分应控制在田间持水量的 60% ~ 70%, 开花期土壤水分应控制在田间持水量的 70% ~ 80%, 鼓粒 ~

成熟期为 65% ~ 75%。综合考虑内蒙古东北部气候、自然和生产特点及大豆不同生育阶段生理特性,并参考前人研究成果,确定大豆苗期、开花期和结荚鼓粒期适宜土壤相对湿度下限值分别为 60%, 70% 和 60%。

由于土壤湿度指标在大豆不同生育期之间存在明显的跳跃性,这不符合作物生长发育规律,实际上,作物生长发育是一个连续和渐变的过程,土壤水分对生长发育的影响也是连续的,即作物适宜的土壤相对湿度下限值应该是连续和动态的。鉴于此,本文将大豆适宜土壤水分下限指标应用多项式拟合技术插值到生育期的每一天,形成适宜土壤湿度下限动态指标曲线应用到模型中,可以更客观和细致地反映大豆生长过程中对土壤水分的需求情况。图 1 中,大豆全生育期土壤水分下限指标(y)与出苗后天数(x)的拟合方程为: $y = 1.107 \times 10^{-6} x^4 - 2.285 \times 10^{-4} x^3 + 0.01 x^2 + 0.198 x + 57.039$,决定系数 R^2 达 0.95,并通过 0.01 的显著性检验。从曲线变化可以看出,大豆幼苗期根系生长较快,茎秆粗壮,节间较短,叶片肥厚,相对比较耐旱,适宜土壤湿度下限也较低,出苗后指标为 59% 左右,随着营养生长愈发旺盛,指标逐渐增加,进入花期后,大豆植株进入营养和生殖并进生长阶段,此期茎叶生长最为旺盛,需水量也达全生育期最多,出苗后 40 ~ 65 d 土壤水分下限指标达 70% 左右,从开花结荚到鼓粒阶段,植株全部转入生殖生长,需水强度相比花期有所下降,为保证干物质运转、积累和后期植株长势,仍需要至少 60% ~ 68% 的土壤水分。

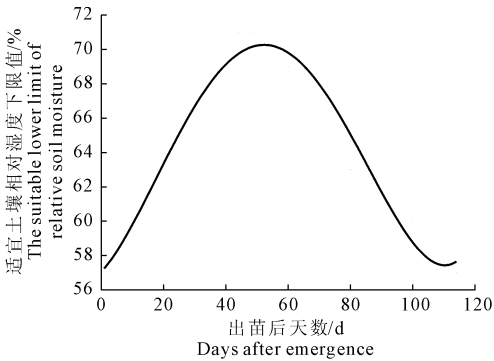


图 1 大豆生育期适宜土壤相对湿度下限值变化曲线
Fig.1 The change curve for suitable lower limit value of relative soil moisture in soybean growth period

1.2 灌溉日期预报方程

根据农田土壤水分平衡原理,一般时段内土壤水分的消耗量可表示为^[11]:

$$W_{t+1} - W_t = R + Q + G - ET_c - B - T - L \quad (1)$$

式中, W_t 、 W_{t+1} 为时段初、末作物根层土壤贮水量

(mm); R 为时段内降水量(mm); Q 为时段内灌溉量(mm); G 为时段内地下水补给量(mm); ET_c 为时段内农田实际蒸散量(mm); B 为时段内作物截留量(mm); T 为时段内地表径流量(mm); L 为渗漏量(mm)。

由于内蒙古东北部降水量和平均降水强度较小,土壤表面干燥,大豆群体密度低,叶面积指数小,所以 B 和 T 可忽略不计。尽管深层土壤水分对作物生长较为重要,但因土壤水肥含量低,土层薄,大豆根系多集中在 0~50 cm 的浅层,气象站土壤水分实际测定深度也为 50 cm,因此 50 cm 以下水分应在下层水补给项中考虑。据此,模型中土壤水分监测深度为 0~50 cm,并将式(1)中的 G 和 L 视作 50 cm 以下土层水分的补给或 50 cm 以上水分的下渗量,用 W_p 表示,则当 W_p 为正值时表示水分补给, W_p 为负值时表示水分下渗,另外, Q 在预报灌溉前为 0。这样,简化后的式(1)可改写为:

$$W_t - W_{t+1} + R - ET_c + W_p = 0 \quad (2)$$

在已知 W_t 和 W_{t+1} 后,利用逐日实时气象资料滚动计算 R 、 ET_c 和 W_p 的累计值,当方程式(2)达到平衡时,即时段内允许消耗的水分等于 0 时,所对应的日期被视作预报灌溉日期。在实际生产中,为了提高该模型计算结果的实用性,以候(5 d 为一个候)为时间步长,提前 5 d 做出预报,则(2)式可改写成:

$$W_n = \sum_{i=1}^n R + \sum_{i=n+1}^{n+5} R + W_t - W_{t+1} - \sum_{i=1}^n ET_c - \sum_{i=n+1}^{n+5} ET_c + \sum_{i=1}^n W_p + \sum_{i=n+1}^{n+5} W_p \quad (3)$$

式中, W_n 为时段内允许的水分消耗量(mm), $\sum_{i=1}^n R$ 、 $\sum_{i=1}^n ET_c$ 和 $\sum_{i=1}^n W_p$ 为时段内实际降水、蒸散量和补给或下渗量的累计值(mm); $\sum_{i=n+1}^{n+5} R$ 、 $\sum_{i=n+1}^{n+5} ET_c$ 和 $\sum_{i=n+1}^{n+5} W_p$ 为未来 5 d 降水、蒸散量和补给或下渗量的累计值(mm),根据多年平均值和天气预报结果计算调整。当 W_n 等于或接近 0 时,所对应的日期即为预报灌溉日期。

在确定大豆适宜土壤水分下限指标和上次灌溉后初始土壤水分含量,水分的消耗量主要取决于实际降水量、蒸散量以及补给或下渗量,可利用历史和实时气象资料,以候为时段,逐日滚动计算水分的输入和支出,逐步推算下次灌溉日期,同时利用未来 5 d 天气预报结果进行修正,此模型可达到滚动预报的效果,可以在实际的气象服务业务中使用,以指导农田合理灌溉。

1.3 预报方程参数的确定

1.3.1 实际蒸散量 ET_c 的计算 $\sum_{i=1}^n ET_c$ 和 $\sum_{i=n+1}^{n+5} ET_c$

分别为时段内实际蒸散量和预测蒸散量的累计值。实际蒸散量是表示作物在某一时间内土壤水分的实际消耗量,包括地面棵间蒸发和植株蒸腾两部分,是农田土壤水分平衡公式中的主要支出项,一般经计算得出^[12]。由于内蒙古东北部降雨少,蒸发强,土壤较干燥,农田大多处于水分不足的状况,潜在和实际蒸散存在明显的差别。本模型利用气象资料根据 Penman - Monteith 公式计算潜在蒸散量 ET_0 ,再用作物系数 K_c 进行订正,进而求出实际蒸散量 ET_c 。

Penman - Monteith 公式的基本形式为^[13]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

式中, ET_0 为潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物冠层表面的净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 为 2 m 高度处的日平均气温($^\circ\text{C}$); u_2 为 2 m 高度处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差(kPa); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。公式中有关参数的计算详见参考文献[13]。

对潜在蒸散量进行订正,可得农田实际蒸散量:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

式中, ET_c 为农田实际蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); K_c 为作物系数; ET_0 为潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。本模型中作物系数 K_c 采用张莹等^[14] 在辽西半干旱区研究得到的单作大豆生育期逐月的作物系数,5—9 月的 K_c 分别为 0.46, 0.65, 1.03, 1.06 和 0.69。预测实际蒸散量 $\sum_{i=n+1}^{n+5} ET_c$ 中的潜在蒸散利用多年平均气象资料来求算。

1.3.2 时段初、末土壤水分 W_t 、 W_{t+1} 和计划湿润层深度的确定 W_t 为时段初土壤贮水量(mm),用出苗时或灌溉后的土壤水分含量表示,由于土壤水分空间变异较大,在实际应用中,一般求多点平均,以增强 W_t 的代表性和精度。 W_{t+1} 为时段末土壤贮水量(mm),用大豆生育期适宜土壤水分下限值(%)来表示,土壤相对湿度(%)折算同深度土壤贮水量(mm)公式为:

$$M = 0.1 dw\theta h \quad (6)$$

式中, M 为土壤贮水量(mm); d 是土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), w 为 0 至 h 深度土壤相对湿度(%), θ 为同深度田间持水量(%); h 为测定的土壤深度(cm), 0.1 是单位换算系数。

大豆计划湿润层土壤深度随根系生长深度变

化,钟南等^[15] 利用试验资料得出,大豆根系的生长函数用三次多项式拟合效果最好,公式可表示为:

$$G(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_1 \\ at^3 + bt^2 + ct + d & T_1 \leq t \leq T_2 \\ 450 & t \geq T_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $G(t)$ 为根深(mm); t 为生长时间(以天为单位,用 d 表示), a 、 b 、 c 、 d 为多项式函数系数,分别为 0.00341, - 0.526, 26.98, - 12.846; T_1 和 T_2 为主根开始生长和停止生长的时间。计划湿润层深度 h 可根据根深作如下修正^[4]:

当 $G(t) \leq 200$ 时, h 取实际根深 $G(t)$;
当 $G(t) > 200$ 时, h 取 $200 + (G(t) - 200)/2$ 。

1.3.3 累计降水量 $\sum_{i=1}^n R$ 和 $\sum_{i=n+1}^{n+5}$ 的确定 $\sum_{i=1}^n R$ 为出苗或灌水当日起至滚动计算之日(n 天)的实测降水量累计值; $\sum_{i=n+1}^{n+5} R$ 为第 n 天后,即第 $n+1$ 天至 $n+5$ 天的预测降水量之和。由于降水的时间变异较大,用多年平均值代替常造成较大误差,所以在对比历年降水情况的同时,参考降水量预报结果,确定 $\sum_{i=n+1}^{n+5} R$ 的值^[4]。

1.3.4 监测层以下水分补给或下渗量 W_p 的计算
一般旱地作物根系入土较深,可利用到深层的土壤水分,同时,土壤水分在一定深度范围内(2 m 以内)可以随毛细管上升到上层土壤中。本文利用内蒙古东北部突泉农业气象试验站 2001—2007 年逐旬实测土壤水分和气象数据,分别求得旬初和旬末土壤贮水量 W_t 和 W_{t+1} ,旬内降水量 R 和实际蒸散量 ET_c ,利用公式(2)求得旬地下水补给或下渗量 W_p ,通过相关分析发现, W_p 与降水量和实际蒸散量的差值($R - ET_c$)存在显著的负相关关系,相关系数为 - 0.870,通过 0.01 水平的显著性检验。 W_p 与($R - ET_c$)的关系可用线性函数拟合(图 2),决定系数 R^2 为 0.757,并通过 0.01 水平的显著性检验。具体函数式如下:

$$W_p = a(R - ET_c) + b \quad (8)$$

式中, W_p 为某旬监测层以下水分补给或下渗量(mm); ($R - ET_c$) 为某旬降水量与蒸散量的差值(mm), a 、 b 分别为 - 0.5156、9.325。当水分上升补充到监测层时 W_p 为正值;当降水较多,下渗到监测层以下时, W_p 为负值。时段内、未来 5 d 水分补给或下渗量的累计值 $\sum_{i=1}^n W_p$ 、 $\sum_{i=n+1}^{n+5} W_p$ 利用时段内和未来 5 d 降水与蒸散量差值的累计值 $\sum_{i=1}^n (R - ET_c)$ 、 $\sum_{i=n+1}^{n+5} (R$

- ET_c) 根据公式(8)求得。

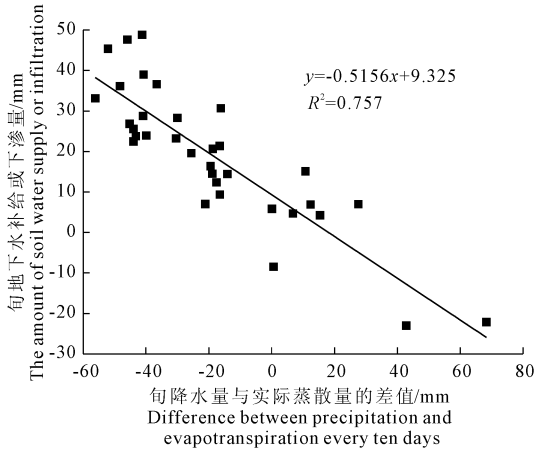


图 2 旬降水量和蒸散量的差值与水分补给或下渗量的拟合图

Fig.2 The fitting figure of the difference between precipitation and evapotranspiration every ten days and soil water supply or infiltration

1.4 灌溉量预报方程

灌溉量预报,即单位面积一次灌水量,随作物发育特性、气候、土壤等自然条件变化而异,可用土壤适宜含水量方法确定。通常用下式计算^[16]:

$$Q_p = 10^4 H \times r (W_U - W_L) / \eta \quad (9)$$

式中, Q_p 为灌水定额($m^3 \cdot hm^{-2}$); H 为计划湿润层深度(m); r 为土层平均容重($t \cdot m^{-2}$); W_U 为适宜土壤含水量上限,取田间持水量的 90% 为宜; W_L 为适宜土壤含水量下限,即灌溉指标; η 为田间水分有效利用系数,一般取 0.85 ~ 0.95,视土壤质地、平整状况而定。

在计算出灌溉量 Q_p 后,再根据未来 5 d 降水量进行修正,即:

$$Q_a = Q_p - \sum_{i=n+1}^{n+5} R \quad (10)$$

式中, Q_a 为预报灌溉量,当 $Q_a < \sum_{i=n+1}^{n+5} R$ 时,则推迟灌溉。

2 模型的检验

利用内蒙古东北部突泉农业气象试验站 2008—2011 年的气象资料和土壤水分数据,验证灌溉预报模型的准确性和实用性。本文以苗期实际测定的土壤含水量作为大豆的 W_t ,将实测土壤湿度达到或接近灌溉指标 W_{t+1} 的日期作为实际应灌溉日期,利用预报模型进行滚动计算(结果见表 1), W_{t+1} 预测值与实测结果相对比,均方根误差(RMSE)为 2.44% (土壤相对湿度),平均绝对百分比误差

(MAPE)为 3.42%;预报灌溉日期与实际应灌溉日期相比较,误差在-3~3 d 之间,可以看出,预报模型对土壤湿度和灌溉日期的预测精度较高,误差均在可接受范围之内,表明该预报模型实用性较强。

此外,从表 1 数据中可以看出,预测日期越长, W_{t+1} 预测值、预测灌溉日期与实际结果偏差越大,这主要是由于预报方程误差随预报时效的延长而累积造成的。

表 1 大豆灌溉日期和灌溉量预报结果检验								
Table 1 The inspected prediction results for the soybean irrigation date and irrigated amount								
年份 Year	W_t /%	W_{t+1} 实 测值/% Measured value of W_{t+1}	W_{t+1} 预 测值/% Predicted value of W_{t+1}	W_{t+1} 出现日期 (月-日) The date of W_{t+1} (m-d)	预报日期 (月-日) Forecasting date(m-d)	相差天 数/d Difference of days	灌溉量 /($m^3 \cdot hm^{-2}$) Irrigated amount	根深/m Root depth
2008	76.8	63.9	60.8	05-29	05-27	-2	1043.3	0.271
2008	76.8	69.1	71.9	06-16	06-18	2	1001.2	0.323
2009	83.3	63.4	61.2	06-08	06-07	-1	1196.0	0.311
2009	83.3	61.4	58.3	07-21	07-18	-3	1476.5	0.345
2010	74.0	67.6	69.5	06-15	06-17	2	1085.8	0.320
2010	74.0	61.1	64.5	07-20	07-23	3	1425.2	0.343
2011	69.0	61.7	61.2	06-06	06-06	0	1268.2	0.307
2011	69.0	65.6	67.2	06-23	06-24	1	1143.0	0.323

3 结论与讨论

本文将大豆适宜土壤水分下限指标应用多项式拟合方法插值到全生育期的每一天,形成适宜土壤湿度下限连续动态指标曲线,解决了土壤水分指标在大豆不同生育期之间存在明显跳跃性的问题,更符合作物生长发育规律,可以合理地反映大豆生长过程中对土壤水分的需求情况,有助于提高灌溉模型预测精度。根据大豆适宜土壤水分下限动态指标及根系生长规律,从农田土壤水分平衡角度出发,利用 2001—2007 年实测气象数据和土壤水分资料,建立了内蒙古东北部大豆灌溉动态预报模型,实现了灌溉日期与灌溉量的滚动预报,通过对 2008—2011 年模型预报检验,结果较为准确,说明该模型实用性较强,在内蒙古东北部大豆种植区具有一定的代表性。对于一般的旗(县)气象站,可利用该模型根据本站气象数据、大豆发育期和初始土壤水分实测值等资料,结合中长期天气预报结果,滚动预报全旗(县)范围大豆灌溉日期和灌溉量,发布适宜灌溉指导产品,为大豆种植户和农业部门提供优化节水灌溉的合理建议。

本文研究结果在当前水资源日益短缺,农业灌溉用水不能增加而粮食产量需增收的背景下,可为有限的灌溉用水在大豆不同生育期优化配置以及对大豆进行精细化灌溉控制上提供一定的科学指导。

参 考 文 献:

[1] 汪志农,尚虎军,柴 萍.节水灌溉预报、管理与决策专家系统研究[J].水土保持研究,2005,9(2):102-108.

[2] 汪志农,吕宏兴,王密侠,等.节水灌溉管理智能决策支持系统研究[J].中国工程科学,2001,3(7):48-58.

[3] 马建琴,邱 林,张振伟,等.区域农业水资源可持续利用多目标优化管理模型及其应用[J].华北水利水电学院学报,2004,25(3):5-8.

[4] 侯 琼,乌兰巴特尔.内蒙古主要作物农田优化灌溉动态预报方法[J].自然灾害学报,2003,12(4):126-130.

[5] 张红亚,王友贞,汤广民,等.安徽省淮北地区旱作物灌溉制度优化的研究[J].南京农业大学学报,2007,30(1):124-128.

[6] 张 兵,袁寿其,李 红,等.基于最优保留策略遗传算法的玉米小麦优化灌溉模型研究[J].农业工程学报,2005,21(7):25-29.

[7] 庞士铨,刘东海,尹瑞龄.大豆生育各时期适宜土壤湿度的初步研究[J].植物生理学通讯,1964,6(11):142-145.

[8] 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):269-273.

[9] 沈 融,章建新,古丽娜.亏缺灌溉对大豆根系生长和养分积累及产量的影响[J].大豆科学,2011,1(30):62-66.

[10] 由剑波,陈志东,高兴民,等.基于干旱区的大豆高效节水灌溉制度制定[J].黑龙江水利科技,2012,1(40):82-83.

[11] 裴步祥,毛 飞,吕厚荃.我国北方春季土壤水分动态模拟预报模式的试验研究[J].北京农业大学学报,1990,16(增刊):116-122.

[12] 刘 倪,夏 伟,吴晓蔚,等.几种参考作物蒸散量计算方法的比较[J].河北科技大学学报,2009,30(1):17-24.

[13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements irrigation and drainage paper[J]. Rome:FAO,1998:1-300.

[14] 张 莹,孙占祥,李 爽,等.辽西半干旱玉米/大豆单作田间耗水规律研究[J].干旱地区农业研究,2010,5(28):43-46.

[15] 钟 南,罗锡文,秦 琴.基于生长函数的大豆根系生长的三维可视化模拟[J].农业工程学报,2008,7(24):151-154.

[16] 胡毓骥,李英能.华北地区节水型农业技术[M].北京:中国农业科技出版社,1995.