

冬小麦适宜播期和播种量设计的动态知识模型研究

朱 艳, 曹卫星, 姜 东, 戴廷波

(南京农业大学/农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

摘要: 运用知识工程和系统建模方法, 在总结、归纳和提炼冬小麦生长发育与品种类型、生态环境和生产技术关系的基础上, 建立具有时空适应性的冬小麦适宜播期、播种量设计动态知识模型, 可用于精确定量不同环境和生产条件下冬小麦品种的适宜播期、基本苗和播种量。利用南京、郑州、泰安、保定、太原 5 个不同生态点的常年、偏暖年和偏冷年每日气象资料以及各点不同土壤肥力和典型品种资料对播期设计模型进行了实例分析, 并利用基本苗和播种量设计模型对泰安地区不同品种、不同土壤类型、不同土壤肥力、不同播期和不同产量水平下的基本苗和播种量进行了设计。结果表明, 知识模型对播期和播种量设计均具有较好的决策性、解释性和适用性。

关键词: 冬小麦; 播期; 基本苗; 播种量; 知识模型

A Dynamic Knowledge Model for Design of Suitable Sowing Date and Sowing Rate of Winter Wheat

ZHU Yan, CAO Wei-xing, JIANG Dong, DAI Ting-bo

(Nanjing Agricultural University / Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095)

Abstract: Based on the summarization, induction, and extraction of dynamic relationships of winter wheat growth characteristics to ecological environments and production conditions, a winter wheat knowledge model, which can be used for decision-making of suitable sowing date, population density and sowing rate of different varieties under different spatial and temporal environments, was developed through knowledge engineering and system analysis method. Case studies on the sowing date design model with the data sets of five different eco-sites, three climatic years and soil fertility levels, and on the population density and sowing rate design model with the data sets of two different variety types, three different soil types, soil fertility levels, sowing dates and yield levels show a good performance of the model system in decision-making, explanation and wide applicability.

Key words: Winter wheat; Sowing date; Population density; Sowing rate; Knowledge model

合理确定适宜播期、基本苗和播种量是小麦栽培管理中的关键技术。建立作物栽培技术指标随品种类型、生态环境、生产技术水平、产量和品质目标变化的动态量化关系, 有助于推动作物栽培模式向定量化和数字化方向发展^[1], 对于发展“精确农作”和“信息农业”具有重要的现实意义和应用前景。生产上现有的播期、播种量确定一般是凭当地农业专家的经验知识而定, 即使是利用农业专家系统来设

计, 也多依赖知识库中的经验性知识规则, 其决策明显受地域性和经验性限制而缺乏动态性和广适性^[2,3]。关于小麦适宜播期、基本苗和播种量的系统化模型目前尚未见报道。

本文基于小麦栽培模式的最新研究资料, 运用知识工程和系统建模方法^[4], 研究建立了具有时空适应性的冬小麦适宜播期、播种量确定的动态知识模型, 较好地解决了传统作物栽培模式和农业专家

收稿日期: 2002-01-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30030090), 国家“863”计划资助项目(2001AA245041, 2001AA115420)

作者简介: 朱 艳(1976-), 女, 江苏通州人, 博士研究生, 主要从事作物模拟与信息农学方面的研究。Tel: 025-4396565; Fax: 025-4395845; E-mail: yanzhu@nau.edu.cn, yanzhu@njau.edu.cn

系统中的不足,从而为发展智能化、信息化和广适性的作物栽培管理决策支持系统奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 模型的建立

在查阅大量文献资料及咨询作物栽培专家的基础上,通过总结、归纳和提炼小麦栽培理论与技术的研究资料,确定了冬小麦生长发育特性与品种类型、生态环境和生产技术水平之间的关系,建立概念模型。然后在资料获取的基础上进行数理统计分析,把已经整理出来的概念模型转化成问题求解的定量数学模型。在此基础上,以 Visual C++ 6.0 为主要编程语言,在 PIII 667 CPU、128M 内存计算机、中文 Windows 98 操作平台上开发实现了符合 COM 标准的可执行知识模型原型系统。最后通过运行实例去检测原型系统的正确性,并通过理解和分析系统的反馈信息,对知识模型中的某些参数进行调整或对知识模型进行必要的修改和完善。

1.2 模型的检验

利用南京、郑州、泰安、保定和太原 5 个不同生态点的常年、偏暖年和偏冷年每日气象资料以及不同品种和土壤资料对所建知识模型的可靠性和适用性进行了较全面的检验。其中,南京常年每日气象资料为 1986~1990 年和 1993~1994 年共 7 年的每日气象资料(由江苏省农业科学院气象站提供)的平均,偏暖年每日气象资料为 1989、1990 和 1994 年 3 个偏暖年每日气象资料的平均,偏冷年每日气象资料为 1987、1988 和 1993 年 3 个偏冷年每日气象资料的平均;郑州常年每日气象资料为 1981~1988 年共 8 年的每日气象资料(由《中国地面气象记录月报》提供)的平均,偏暖年每日气象资料为 1983、1984 和 1988 年 3 个偏暖年每日气象资料的平均,偏冷年每日气象资料为 1981、1986 和 1987 年 3 个偏冷年每日气象资料的平均;泰安常年每日气象资料为 1993~2000 年共 8 年的每日气象资料(由山东省泰安农场气象站提供)的平均,偏暖年每日气象资料为 1994、1995 和 1998 年 3 个偏暖年每日气象资料的平均,偏冷年每日气象资料为 1996、1997 和 2000 年 3 个偏冷年每日气象资料的平均;保定常年每日气象资料为 1966~1975 年共 10 年的每日气象资料(由河北省保定市气象局提供)的平均,偏暖年每日气象资料为 1966、1971 和 1975 年 3 个偏暖年每日气象资料的平均,偏冷年每日气象资料为 1967、1968 和 1969 年 3 个偏冷年每日气象资料的

平均;太原常年每日气象资料为 1981~1988 年共 8 年的每日气象资料(由《中国地面气象记录月报》提供)的平均,偏暖年每日气象资料为 1982、1983 和 1988 年 3 个偏暖年每日气象资料的平均,偏冷年每日气象资料为 1981、1985 和 1986 年 3 个偏冷年每日气象资料的平均。典型品种(南京用扬麦 158,郑州用豫麦 62,泰安用鲁麦 22 和鲁麦 7 号,保定用京 411,太原用晋麦 59)的生育特性和土壤资料分别由南京农业大学、河南农业大学、山东农业大学、河北农业大学和山西农业大学提供。

2 结果与分析

2.1 模型算法的描述

2.1.1 播期确定 适宜播期可保证小麦生育进程与最佳季节同步,确保植株在主要生育时期达到相应的生长发育指标。本模型用冬前形成壮苗且能安全拔节作为冬小麦播期确定的依据^[3,5~9]。冬前壮苗的形成必须满足一定的积温(ATBW),其值由播种到出苗所需的积温(ATSE)和出苗到越冬所需的积温(ATEW)两部分计算得到[方程(1)~(3)]

$$ATBW = ATSE + ATEW \quad (1)$$

$$ATSE = 40 + 10.2 \times SDEPTH + 27.2 \quad (2)$$

$$ATEW = LNBW \times PHYLL \quad (3)$$

方程(2)中,常数 40 是指当土壤含水量达到田间持水量的 70%~75%时,种子吸水膨胀到萌发所需的生长度日;系数 10.2 是指胚芽鞘在土壤中每伸长 1 cm 所需的生长度日^[10];常数 27.2 是指胚芽鞘出土到出苗所需的生长度日^[11];SDEPTH 为播种深度(cm),本模型建议取适宜播种深度(PSDEPTH),以下同。一般情况下,冬性品种小麦的适宜播种深度为 3~5 cm,半冬性或春性品种为 2~3 cm。本文用基于发育特性的品种生理春化时间(PVT, 0~60)^[12]计算不同品种的适宜播种深度[方程(4)]

$$PSDEPTH = 2 + PVT/20 \quad (4)$$

方程(3)中,PHYLL 为叶热间距,即连续 2 片叶子出现之间的热时间间隔,其大小随品种而异,以下同;LNBW 为适宜的冬前主茎叶片数,其值随产量水平、品种特性、生态环境及栽培管理措施的不同而不同。正常条件下,小麦分蘖的发生与主茎叶片伸出保持 n-3 的同伸关系^[3]。但在播期、播种深度、基本苗、土壤肥水等均处于最佳条件时,小麦分蘖的发生与主茎叶片的伸出则出现 n-2.5 的超同伸关系。根据上述同伸关系,冬前适宜主茎叶片数可以用方程(5)来推算。

$$\text{LNBW} = 2.3087 + 2.0143 \times \ln(\text{STTNBW}) \quad (5)$$

方程(5)中,STTNBW为冬前单株理论茎蘖数,可以通过冬前单株实际茎蘖数(SATNBW)与茎蘖实际发生率(TAER)的比值计算得到[方程(6)]

$$\text{STTNBW} = \text{SATNBW}/\text{TAER} \quad (6)$$

SATNBW可通过单位面积冬前群体实际茎蘖数(CATNBW)与基本苗(PN)的比值求得[方程(7)]。茎蘖实际发生率的量化见方程(14)~(17)。

$$\text{SATNBW} = \text{CATNBW}/\text{PN} \quad (7)$$

上式中,PN取适宜基本苗(PPN),PPN的计算见2.1.2部分,CATNBW的计算如方程(8)所示。

$$\text{CATNBW} = \text{SNX} \times \text{CSN} \quad (8)$$

方程(8)中,CSN为目标产量下要求达到的每公顷成穗数(万个),通过方程(9)来计算,以下同。方程(9)中,VSN、VGN、VTGW和VY分别为正常条件下特定品种的每公顷穗数(万个)、穗粒数(粒)、千粒重(g)和每公顷产量(kg),TY为每公顷目标产量(kg),以下同;CFYI为穗数对增产的贡献率。在小麦由中产向高产发展的过程中,北方麦区产量的增加主要依赖于穗数的提高,黄淮麦区通过提高穗数或穗重均可达到提高产量的目的,而长江中下游麦区则只能靠提高穗重来实现高产^[8,13,14],同时CFYI还与品种有关,其值一般在-0.1~1之间变化。因此,CFYI可以通过1月份平均温度(T1)和品种穗数对增产的贡献率大小VCFYI(0~1)计算得到[方程(10)]

$$\text{CSN} = \begin{cases} \frac{(\text{VY} + \text{CFYI} \times (\text{TY} - \text{VY})) \times 100}{\text{VGN} \times \text{VTGW}} & \text{TY} > \text{VY} \\ \text{VSN} & \text{TY} \leq \text{VY} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{CFYI} = \begin{cases} 1 \times \text{VCFYI} & -8 \leq \text{T1} \leq -4 \\ (-0.1375 \times \text{T1} + 0.45) \times \text{VCFYI} & -4 < \text{T1} < 4 \\ -0.1 + 0.1 \times \text{VCFYI} & 4 \leq \text{T1} \leq 8 \end{cases} \quad (10)$$

方程(8)中,SNX为单位面积冬前群体茎蘖数应该达到最后成穗数的倍数。大量的小麦栽培研究^[3,8,9]表明,当土壤肥水状况处于理想条件时,SNX值随品种有效分蘖成穗率的提高而降低,一般在1~2.5之间变化。北方麦区由于越冬期气候寒冷,SNX值有升高趋势。因此,以1月份的平均温度(T1)表示决策点越冬期寒冷程度,通过品种的有效分蘖成穗率(VETSR,0~1),计算土壤肥水充足情况下的单位面积冬前群体茎蘖数与最后成穗数的比值(SNXP)[方程(11)]。SNX则可以通过土壤肥水丰缺因子(FWI)对SNXP做进一步修订得到[方程(12)~(13)]

$$\text{SNXP} = \begin{cases} 2.5 - 1.5 \times \text{VETSR} - 0.0625 \times \text{T1} & -8 \leq \text{T1} < 0 \\ 2.5 - 1.5 \times \text{VETSR} & 0 \leq \text{T1} \leq 8 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{SNX} = \begin{cases} \text{SNXP}/\text{FWI} & \text{FWI} > 0.5 \\ \text{SNXP}/0.5 & \text{FWI} \leq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{FWI} = \min(\text{FI}, \text{WI}) \quad (13)$$

方程(13)中,FI和WI分别为土壤养分和水分丰缺因子,由用户根据实际情况确定(0~1),以下同。茎蘖实际发生率(TAER)除了受品种分蘖力(TA_{var})影响外,还受播期、基本苗、播种深度、土壤水分和养分等条件的影响和制约,其计算见方程(14)。

$$\text{TAER} = \text{TA}_{\text{var}} \times \text{EI} \quad (14)$$

方程(14)中,EI为除品种分蘖力以外的其它影响因子对茎蘖实际发生率的综合影响,通过各影响因子 U_i (土壤肥水丰缺因子FWI、播期因子SDI、基本苗因子PNI和播种深度因子SDHI)及其相应的相对权重(W_i)量化表示[方程(15)]

$$\text{EI} = \sum_{i=1}^n W_i U_i \quad (15)$$

方程(15)中,相对权重即某个因子对EI的作用大小,其计算分两种情况考虑:一种是影响因子(U_i)中存在明显的限制因子,另一种则是没有明显的限制因子存在^[15]。判断是否存在明显限制因子的方法,是找出所有影响因子中的最小因子 U_{\min} ,如果 $U_{\min} \geq 0.2$,则认为没有限制因子存在;否则, U_{\min} 为明显的限制因子。具体计算见方程(16)~(17)。其中,平方处理是一个反馈器,它可使限制性大的因子相对权重更大,限制性小的因子相对权重更小,从而使计算结果与实际情况更好地吻合。

$$U_{\min} = \min(U_i) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (16)$$

小麦生产上计算适宜播期时一般认为基本苗和播种深度均处于适宜范围之内。因此,方程(15)~(17)中,SDI、PNI和SDHI值均为1;FWI的计算见方程(13)。根据决策点气象资料,以气温稳定小于3℃的始日为越冬始期向前倒推,当累积生长度日(AGDD)等于ATBW时的日期即为所求的冬前形成壮苗的适播期。AGDD的计算如方程(18)~(19)。

方程(19)中, T_{\max} 为日最高气温, T_{\min} 为日最低气温, T_b 为冬小麦生长的基点温度,本模型设冬前冬小麦生长的基点温度为0℃^[12]。

$$W_i = \begin{cases} \frac{(1 - U_i)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - U_i)^2} & 0.2 \leq U_{\min} < 1 \\ 1 - U_{\min} & U_{\min} < 0.2 \text{ \& } i = \min \\ \frac{(1 - U_i)^2}{\sum_{i=1}^{n-1} (1 - U_i)^2} \times U_{\min} & U_{\min} < 0.2 \text{ \& } i \neq \min \end{cases} \quad (17)$$

$$AGDD = \sum(GDD) \quad (18)$$

$$GDD = \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b \right) \quad (19)$$

适播期的确定不仅要考虑冬前形成壮苗,而且要保证冬后安全拔节。返青之后温度稳定通过 10°C 的日期为小麦安全拔节期(SJD)。而冬前形成壮苗的适播期下的相应实际拔节期(AJD)可以通过生理发育时间恒定的原理预测得到,即根据决策点的气象资料,从冬前形成壮苗的适播期下的出苗期开始计算生理发育时间,当生理发育时间累积达到16.1时的日期即为AJD。其中生理发育时间的计算采用严美春等人的方法^[12]。如果AJD早于SJD,则计算实际拔节期与安全拔节期之间的累积生长度日,然后按此累积生长度日将冬前形成壮苗的适播期适当后移,否则,将冬前形成壮苗的适播期作为冬前形成壮苗且能安全拔节的适播期(SSJSD)。按上述方法计算的适播期是以产量为目标的适播期。研究^[16~19]表明,在一般的播期幅度范围内,随播期的推迟,籽粒蛋白质和赖氨酸含量逐渐增加,反之则减少,但在适播期前后的15 d内籽粒蛋白质含量差异不显著。因此,考虑到播期对品质和产量的不同步影响,如果要提高籽粒蛋白质含量,则将上述适播期推迟5 d,如果要降低籽粒蛋白质含量,可将上述适播期提早5 d。同时,结合前茬作物所能提供的最早播期确定最后的播期(ASD,前茬收获期早于所算播期,则所算播期为最后播期;前茬收获期迟于所算播期,则前茬收获期为最后播期)。

2.1.2 播种量设计 合理基本苗(PPN,每公顷万株)是获得适宜群体起点的保证,本模型首先通过单位面积群体成穗数(CSN,每公顷万穗)与单株可靠成穗数(SESN)来定量计算适宜基本苗[方程(20)]。

$$PPN = CSN / SESN \quad (20)$$

小麦分蘖是否有效,其内在的机理是分蘖有足够的时间形成自身独立的根系。以有效分蘖可靠叶龄期作为小麦发生有效分蘖的终止期,即有效分蘖可靠叶龄期前发生的分蘖为有效分蘖,以后发生的分蘖为无效分蘖。因此,方程(20)中,单株可靠成穗数可以用有效分蘖可靠叶龄期的单株理论茎蘖数(STTN)、茎蘖实际发生率(TAER)和品种的有效分蘖成穗率(VETSR)估算[方程(21)]。

$$SESN = STTN \times TAER \times VETSR \quad (21)$$

方程(21)中,茎蘖实际发生率(TAER)的计算见方程(14)~(17)。合理基本苗确定时一般可以假设播种深度处于推荐的适宜范围内,即PNI和SD-

HI的值均为1。FWI的计算见方程(13);播期影响因子(SDI)的计算见方程(22)。方程(22)中,ATPSW为冬前形成壮苗且能安全拔节的适播期(SSJSD)与越冬始期之间的有效积温,ATASW为实际播期(ASD)与越冬始期之间的有效积温,ATEW为出苗到越冬所需的有效积温。

$$SDI = 1 - \frac{ATPSW - ATASW}{ATEW} \quad (22)$$

方程(21)中,STTN可根据 $n-2.5$ 的叶蘖同伸关系用方程(23)来定量描述。

$$STTN = 0.3205 \times e^{0.4949 \times LA} \quad (23)$$

方程(23)中,LA为有效分蘖可靠叶龄期的主茎叶龄^[3],其定量描述见方程(24)。其中,TLN为特定品种的总叶片数,IN为伸长节间数,JLN为小麦拔节期有效分蘖可靠叶片数,其值随品种类型而异,见方程(25)。

$$LA = TLN - IN - JLN + 3 \quad (24)$$

$$JLN = 0.5 \times TLN - 2 \quad (25)$$

按上述方法计算的基本苗是以产量为目标的适宜基本苗。而优质专用小麦的品质也受到播种密度的调控^[16~19]。在以高产为目标的适宜播种密度范围内,随密度的增加,产量减少,蛋白质和赖氨酸含量有所增加。本文通过密度对品质的影响因子(PDQI)对以产量为目标的适宜基本苗进行修订得到优质专用小麦的适宜基本苗(QPPN),见方程(26)、(27)。方程(27)中,TQ(%)为目标品质,AQ(%)为当地平均品质,主要以籽粒蛋白质含量表示。

$$QPPN = PPN \times PDQI \quad (26)$$

$$PDQI = 1 + (TQ - AQ) \times 0.3 \quad (27)$$

播种量(SR, $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)是在基本苗的基础上,根据千粒重(TGW, g)、种子纯净度(SP, %)、发芽率(GR, %)及出苗率(ER, %)等计算得到[方程(28)]。

$$SR = \frac{QPPN \times TGW}{100 \times SP \times GR \times ER} \quad (28)$$

方程(28)中,假设小麦种子纯净度和发芽率均符合国家标准,分别取98%和95%;出苗率比较复杂,除了受种子质量、温度、水分和氧气影响外,还受到土壤容重、含盐量、pH值、播种深度、整地质量和播种质量等因子的影响和制约。而且,一般情况下,土壤中氧气的多少主要受土壤含水量或土壤松紧度大小的影响。因此,本模型把氧气因子分解到水分因子和容重因子中去,通过各影响因子 Ui (种子质量因子SQI、温度因子TI、水分因子SWI、土壤含盐量因子SSI、土壤pH因子SPHI、容重因子SBDI、播

种深度因子 SDHI、整地质量因子 PFQI 和播种质量因子 PQI) 以及各因子的相对权重 (W_i) 来综合计算出苗率 (ER) [方程 (29)]。其中, W_i 的计算见方程 (16) (17)。

$$ER = \sum_{i=1}^n W_i U_i \quad (29)$$

饱满、生活力强的种子出苗率高, 本模型将种子质量、整地质量和播种质量分为高、中上、中等、中下和差 5 个水平, SQI、PFQI 和 PQI 分别依次取值为 1、0.8、0.6、0.4 和 0.2。播种量计算过程中可以假设播种深度处于推荐的适宜范围之内, 即 SDHI 取值为 1。

小麦种子萌发和出苗的最适温度为 15~20℃, 最低温度为 0~1℃, 最高温度为 35~40℃^[3, 5~8]。因此, 温度因子 (TI) 可以用方程 (30) 定量计算。其中, A_T 为播种后 3 d 内的实际气温平均值。

$$TI = \begin{cases} e^{-\left(\frac{15-A_T}{A_T-0}\right)} & 0 < A_T < 15 \\ 1 & 15 \leq A_T \leq 20 \\ 1 - e^{-\left(\frac{40-A_T}{A_T-20}\right)} & 20 < A_T < 40 \\ 0 & A_T \leq 0 \text{ 或 } A_T \geq 40 \end{cases} \quad (30)$$

据研究, 小麦种子吸水达 40% 时开始萌发; 适于萌发和出苗的土壤含水量为田间持水量的 70%~75%; 当土壤含水量为田间持水量的 60% 时, 种子虽可以萌动, 但以后水分不足会造成回芽, 使幼芽、幼根干缩, 如土壤含水量超过田间持水量的 80%~90% 时, 因土壤中空气不足, 发芽率下降^[3, 5~8]。因此, 水分因子 (SWI) 用方程 (31) 量化表示。其中, A_W 为实际土壤含水量占田间持水量的比例。

$$SWI = \begin{cases} e^{-\left(\frac{0.7-A_W}{A_W-0.4}\right)} & 0.4 < A_W < 0.7 \\ 1 & 0.7 \leq A_W \leq 0.75 \\ 1 - e^{-\left(\frac{1-A_W}{A_W-0.75}\right)} & 0.75 < A_W < 1 \\ 0 & A_W \leq 0.4 \text{ 或 } A_W \geq 1 \end{cases} \quad (31)$$

土壤中较高的含盐量使种子吸水困难, 发芽迟缓。当土壤含盐量低于 0.08% 时, 出苗率正常; 含盐量在 0.25% 以上时, 出苗率显著下降; 当土壤含盐量达到 0.4% 时, 小麦种子即失去萌发能力^[5, 8]。因此, 土壤含盐量因子 (SSI) 通过方程 (32) 计算得到。其中, A_S 为土壤实际含盐量。

$$SSI = \begin{cases} 1 & A_S < 0.0008 \\ 1 - e^{-\left(\frac{0.004-A_S}{A_S-0.0008}\right)} & 0.0008 \leq A_S < 0.004 \\ 0 & A_S \geq 0.004 \end{cases} \quad (32)$$

研究^[20]表明, 小麦生长的适宜土壤 pH 值为

6~7, 能够生长的 pH 值为 5~8。本文用方程 (33) 来定量描述土壤 pH 值对出苗率的影响, 即土壤 pH 因子 (SPHI)。其中, A_{pH} 为土壤实际 pH 值。

研究^[3, 8, 11]表明, 耕层土壤容重以 1.15~1.25 $g \cdot cm^{-3}$ 比较适宜。如土壤容重过大, 则土体紧实, 透水透气性差; 土壤容重过小, 则土层过松, 非毛管孔隙大, 保水性差。因此, 用方程 (34) 定量描述土壤容重因子 (SBDI)。其中, A_{BD} 为土壤实际容重。

$$SPHI = \begin{cases} A_{pH} - 5 & 5 < A_{pH} < 6 \\ 1 & 6 \leq A_{pH} \leq 7 \\ 8 - A_{pH} & 7 < A_{pH} < 8 \end{cases} \quad (33)$$

$$SBDI = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{1.8-A_{BD}}{A_{BD}-1.25}\right)} & 1.25 < A_{BD} \leq 1.80 \\ 1 & 1.15 \leq A_{BD} \leq 1.25 \\ e^{-\left(\frac{1.15-A_{BD}}{A_{BD}-0.8}\right)} & 0.80 \leq A_{BD} < 1.15 \end{cases} \quad (34)$$

2.2 模型实例分析

利用南京、郑州、泰安、保定和太原 5 个不同生态点不同年型的气象资料、各点的不同土壤肥力及典型品种资料对播期设计模型进行实例分析。各点不同年型的冬前 (10 月 1 日至越冬始期) 有效积温见表 1, 模型设计结果见表 2。可以看出, 播期设计模型具有较好的适用性和决策性, 模型设计值与现阶段 5 个生态点的小麦高产栽培模式^[3, 5~9, 11, 16, 21]之间具有较好的一致性和符合度。

利用基本苗和播种量设计模型, 对泰安地区常年适宜播期、适宜土壤含水量和土壤类型 (粘壤土) 下不同品种和土壤肥力状况下的基本苗和播种量进行播前设计。模型设计结果 (表 3、4) 与决策点的小麦高产栽培模式^[5, 8, 21]之间具有较好的符合度, 表明模型具有较强的可靠性和预测性。

3 讨论

笔者在已有小麦栽培理论与技术研究资料的基础上, 通过解析冬小麦生长发育特性与品种类型、生态环境、生产技术水平、产量和品质目标之间的量化关系, 建立了具有时空适应性的冬小麦适宜播期和播种量设计动态知识模型。采用 Visual C++ 6.0 为主要编程语言, 在 P III 667 CPU、128M 内存计算机、中文 Windows 98 操作平台上开发实现了符合 COM 标准的可执行知识模型原型系统。并用不同纬度、不同年份、不同品种、不同土壤类型、不同土壤肥力和不同产量水平资料对所建知识模型系统进行了较全面的实例分析和检验。结果表明, 模型具有较好的预测性、决策性和适用性。

表 1 南京、郑州、泰安、保定和太原 5 个不同生态点不同年型的冬前有效积温

Table 1 Effective accumulative temperature before winterovering in different climatic years of five different eco-sites

决策地点 Decision site		冬前有效积温 Effective accumulative temperature before winterovering (°C)		
		常年 Normal year	偏暖年 Warm year	偏冷年 Cool year
南京	Nanjing	1 084.9	1 132.5	922.1
郑州	Zhengzhou	779.1	836.5	675.0
泰安	Taian	647.7	696.8	572.7
保定	Baoding	591.5	660.9	485.5
太原	Taiyuan	436.4	482.5	368.8

表 2 南京、郑州、泰安、保定和太原 5 个不同生态点典型品种在不同年型、不同土壤肥力条件下的适宜播期设计结果

Table 2 Suitable sowing dates under different climatic years and soil fertility levels for typical varieties of five different eco-sites designed by knowledge model

决策地点 Decision site		品种 Variety		适播期(月-日) Suitable sowing date(mo-d)					
				常年 Normal year			偏暖年 Warm year		偏冷年 Cool year
				高肥力土壤 High fertility	中肥力土壤 Medium fertility	低肥力土壤 Low fertility	高肥力土壤 High fertility	高肥力土壤 High fertility	
南京	扬麦 158	10-30	10-26	10-24	11-03	10-26			
Nanjing	Yangmai158								
郑州	豫麦 62	10-08	10-05	10-02	10-13	10-03			
Zhengzhou	Yumai62								
泰安	鲁麦 22	10-03	09-30	09-27	10-06	09-28			
Taian	Lumai22								
保定	京 411	09-27	09-25	09-23	10-02	09-22			
Baoding	Jing411								
太原	晋麦 59	09-21	09-18	09-15	09-24	09-16			
Taiyuan	Jinmai59								

表 3 泰安地区常年适宜播期、土壤含水量和土壤类型下不同品种类型和土壤肥力状况下的适宜基本苗和播种量设计结果

Table 3 Suitable population density and sowing rate under different variety types , soil fertility levels , suitable sowing date , soil water content and soil type in Taian area during normal year designed by knowledge model

土壤肥力 Soil fertility level		鲁麦 22(低分蘖成穗率型) Lumai22(low effective tiller percentage type)		鲁麦 7 号(高分蘖成穗率型) Lumai7(high effective tiller percentage type)	
		每公顷基本苗(万株) Population density ten thousand per ha	每公顷播种量 Sowing rate per ha (kg)	每公顷基本苗(万株) Population density ten thousand per ha	每公顷播种量 Sowing rate per ha (kg)
		高肥力土壤 High fertility	208.5	109.0	135.5
中肥力土壤 Medium fertility	249.5	130.5	162.0	77.7	
低肥力土壤 Low fertility	319.0	167.0	207.0	99.5	

表 4 鲁麦 22 在泰安地区常年不同播期、不同产量水平和不同土壤类型下的适宜基本苗和播种量(高肥力) 设计结果

Table 4 Suitable population density and sowing rate of Lumai22 under different sowing dates , yield levels and soil types in Taian area during normal year designed by knowledge model

播期(月-日) Sowing date (mo-d)	每公顷产量水平 Yield level per ha (kg)	土壤类型 Soil type	每公顷基本苗(万株) Population density ten thousand per ha	每公顷播种量 Sowing rate per ha(kg)
09-26 早播 Early sowing	8 250	粘壤土 Clay loam with 1.25 g·cm ⁻³ bulk density	168.0	88.0
10-03 适播 Suitable sowing	8 250	粘壤土 Clay loam with 1.25 g·cm ⁻³ bulk density	208.5	109.0
		砂土 Sand with 1.40 g·cm ⁻³ bulk density	185.7	114.7
		粘壤土 Clay loam with 1.25 g·cm ⁻³ bulk density	185.7	97.0
		粘土 Clay with 1.10 g·cm ⁻³ bulk density	185.7	112.3
		粘壤土 Clay loam with 1.25 g·cm ⁻³ bulk density	162.8	85.0
10-10 迟播 Late sowing	8 250	粘壤土 Clay loam with 1.25 g·cm ⁻³ bulk density	280.0	146.5
10-17 晚播 Later sowing	8 250	粘壤土 Clay loam with 1.25 g·cm ⁻³ bulk density	385.0	200.5

与已有的传统小麦栽培模式^[3~9,11,21]及栽培管理专家系统^[2]相比,本模型用分蘖力和有效分蘖成穗率来定量表达品种间差异对播期和播种量的影响,并根据‘以产定穗,以穗定叶’的原理动态量化了不同产量水平下的冬前适宜主茎叶片数,通过土壤容重、含水量、含盐量及整地质量和播种深度因子等综合考虑了不同土壤类型和栽培管理措施对出苗率的影响,通过土壤肥水丰缺因子、播期因子、基本苗因子和播种深度因子等定量计算了不同环境条件下的茎蘖实际发生率,同时引入相对权重法量化表达受多个生态环境因子影响的茎蘖实际发生率和出苗率,并且通过品质影响因子对以产量为目标的播期和密度进行了修订,从而使模型具有较好的解释性和适用性。模型检验的结果进一步证实了上述定量算法的准确性和可靠性。

本模型通过建立气象、品种、土壤等生态环境与冬小麦适宜播期、基本苗和播种量之间的定量动态关系,克服了传统作物栽培模式^[3~9,11,21]及农业专家系统^[2]中经验知识规则的时空适应性差等弱点,原则上能用于不同地点、土壤、品种、生产技术水平、产量和品质目标下的冬小麦播前方案设计,从而使现有小麦栽培模式中对播期、基本苗和播种量的定性、半定量描述上升到定量化和模型化的水平,为数字化和智能化农作管理系统的建立奠定基础。然而,模型中有关品质影响因子对播期和密度的定量影响,由于受小麦优质栽培技术研究结果的限制,有待进一步修改和完善,从而使该模型更好地应用于小麦生产实践。

References

- [1] 曹卫星. 作物智能栽培学: 信息科学与作物栽培学的结合. 科技导报, 2000, 13(1): 37 - 41.
Cao W X. Intelligent Crop Culture: Combination of information science and crop culture science. *Science and Technology Review*, 2000, 13(1): 37 - 41. (in Chinese)
- [2] 熊范纶, 乔克智, 胡海瀛. 农业专家系统及开发工具. 北京: 清华大学出版社, 1999.
Xiong F L, Qiao K Z, Hu H Y. *Agricultural Expert System and Development Tool*. Beijing: Qinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 郭绍铮, 彭永欣, 钱维林, 陈子威. 江苏麦作科学. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994: 121 - 313.
Guo S Z, Peng Y X, Qian W L, Chen Z W. *Tritical Crops Science and Technology in Jiangsu Province*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1994: 121 - 313. (in Chinese)
- [4] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 华文出版社, 2000: 124 - 128.
Cao W X, Luo W H. *Crop System Simulation and Intelligent Management*. Beijing: Huawen Press, 2000: 124 - 128. (in Chinese)
- [5] 山东农学院主编. 作物栽培学(北方本)上册. 北京: 农业出版社, 1991: 22 - 168.
Shandong Agricultural University. *Crop Culture Science (Volume I, For North China)*. Beijing: Agricultural Press, 1991: 22 - 168. (in Chinese)
- [6] 南京农业大学主编. 作物栽培学(长江中下游地区适用). 北京: 农业出版社, 1991: 99 - 144.
Nanjing Agricultural University. *Crop Culture Science (For the Middle and Lower Area of Yangtse River)*. Beijing: Agricultural Press, 1991: 99 - 144. (in Chinese)
- [7] 刁操铨主编. 作物栽培学各论(南方本). 北京: 中国农业出版社, 1997: 98 - 124.
Diao C Q. *Crop Culture Science (For South China)*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1997: 98 - 124. (in Chinese)
- [8] 山东省农业厅编著. 山东小麦. 北京: 农业出版社, 1990.
Agricultural Department of Shandong Province. *Wheat in Shandong Province*. Beijing: Agricultural Press, 1990. (in Chinese)
- [9] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 217 - 292.
Ling Q H. *Crop Population Quality*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2000: 217 - 292. (in Chinese)
- [10] Ritchie J T, Nesmith D S. Temperature and crop development. *Agronomy Monograph*. 1991, 31: 5 - 29.
- [11] 河南省农业科学院. 河南小麦栽培学. 郑州: 河南科学技术出版社, 1988.
Henan Academy of Agricultural Science. *Wheat Culture Science in Henan Province*. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [12] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 江海东. 小麦发育过程及生育期机理模型的研究 I: 建模原理与模型描述. 应用生态学报, 2000, 11(3): 355 - 359.
Yan M C, Cao W X, Luo W H, Jiang H D. A mechanistic model of phasic and phenological development in wheat I: Assumption and description of the model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 355 - 359. (in Chinese)
- [13] 余金龙. 长江中下游表区不同产量水平下的小麦产量结构分析. 国外农学—麦类作物, 1995 (6): 40 - 41.
YU J L. Analysis of wheat yield components under different yield levels in the middle and lower area of Yangtse river. *Agronomy in Foreign Country-Tritical Crops*, 1995 (6): 40 - 41. (in Chinese)
- [14] 王立平. 近年京郊小麦产量结构分析及进一步增产的措施建议. 北京农业科学, 1998, 16(4): 10 - 13.
Wang L P. Analysis of wheat yield components in recent years and suggestion of management for more yield in Beijing suburb. *Beijing Journal of Agricultural Sciences*, 1998, 16(4): 10 - 13. (in Chinese)

- [15] 张军连,林 培. 土地生产潜力评价中土壤修正系数模型的研究—以河北省涿鹿县为例. 自然资源学报, 1994 ,9(3): 260 - 270.
Zhang J L , Lin P. A study on the calculation model of the soil modification coefficient for land potential productivity evaluation in Zhuolu County ,Hebei. *Journal of Natural Resources* ,1994 9 (3): 260 - 270. (in Chinese)
- [16] 王龙俊,郭文善,封超年. 小麦高产优质栽培新技术. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
Wang L J ,Guo W S , Feng C N. *New Cultivation Technologies for High Yield and Quality Wheat*. Shanghai : Shanghai Science and Technology Press ,2000. (in Chinese)
- [17] 于振文,王月福,王 东,王旭东,潘庆民. 优质专用小麦品种及栽培. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Yu Z W ,Wang Y F , Wang D , Wang X D , Pan Q M. *Wheat Varieties for Specific End-uses and Cultivation*. Beijing : China Agriculture Press ,2001. (in Chinese)
- [18] 杨永光,张维城,吴玉娥,宋飞琼,李慧芳. 播量对小麦产量和籽粒营养品质的影响. 河南职业技术师范学院学报, 1989 ,17(3 , 4): 113 - 116.
Yang Y G ,Zhang W C , Wu Y E , Song F Q , Li H F. Effects of sowing rate on wheat yield and grain nutrient quality. *Journal of Henan Vocation-Technical Teachers College* , 1989 ,17(3 ,4): 113 - 116. (in Chinese)
- [19] 蔡大同,王义炳,茆泽圣. 不同生态条件下播期和氮肥对优质小麦产量和品质性状的影响. 植物营养与肥料学报, 1994 , (1): 74 - 82.
Cai D T ,Wang Y B , Mao Z S. Effects of sowing date and nitrogen rate on wheat yield and quality under different ecology conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* ,1994 (1): 74 - 82. (in Chinese)
- [20] 金善宝. 中国小麦学. 北京: 中国农业出版社, 1996.
Jin S B. *Wheat Science in China*. Beijing : Chinese Agriculture Press ,1996. (in Chinese)
- [21] 于振文,潘庆民,董庆裕,田奇卓. 冬小麦超高产栽培. 北京: 中国农业出版社, 1999.
Yu Z W ,Pan Q M , Dong Q Y , Tian Q Z. *Winter Wheat Cultivation for Super-High Yield*. Beijing : Chinese Agricultural Press ,1999. (in Chinese)

(责任编辑 卞海军)