

基于本体的作物系统模拟框架构建研究

姜海燕^{1,2}, 朱艳¹, 汤亮¹, 花登峰¹, 曹卫星¹

(¹南京农业大学农学院/江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 南京 210095; ²南京农业大学信息科技学院, 南京 210095)

摘要: 【目的】研究作物系统模拟框架 (CSSF) 可以为构建作物生长模型及设计可重用的作物系统模拟软件提供基础框架。【方法】将本体技术应用于作物模拟模型领域, 以作物生长的基础生理生态过程为主线, 基于仿真本体和作物模拟本体, 综合分析提炼稻麦棉油等作物的建模流程、生长模拟模型算法及模型参数中的共性概念及概念之间的相互关系, 构建了 CSSF。【结果】CSSF 包括作物建模外部知识框架 (CMOKF) 和作物模型内部知识框架 (CMIKF), 其中 CMOKF 提炼了作物系统受时间、空间和自然环境共同驱动的共享特征, CMIKF 描述了生育期、生物量积累、干物质分配与产量形成、器官建成、作物-土壤水分动态和养分平衡等作物模型组分与模型算法的共性特征。【结论】CSSF 实现了作物建模概念、流程、结构和方法的知识级共享, 对设计可重用的作物模型软件体系结构具有指导作用。

关键词: 作物; 模拟模型; 本体; 建模框架; 组分框架; 算法框架

Study on Ontology-Based Framework of Crop System Simulation

JIANG Hai-yan^{1,2}, ZHU Yan¹, TANG Liang¹, HUA Deng-feng¹, CAO Wei-xing¹

(¹College of Agronomy, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing 210095;

²College of Information Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Abstract: 【Objective】The Crop System Simulation Framework (CSSF) is the basis of the reconfigurable simulation software about the crop model resource mapping and design. 【Method】This research bring the technology of ontology into the field of crop system simulation. Based on the physiological and ecological processes of crop growth, the common characteristics and relationships of crop system (wheat, rice, cotton, rapeseed) modeling processes, model algorithm and model parameters were analyzed and extracted with the ontologies of simulation and crop simulation, the CSSF were constructed. 【Result】CSSF includes outer (CMOKF) and inner (CMIKF) knowledge frameworks of crop modeling. CMOKF describes the outer common characteristics driven by time, space and environment, while CMIKF describes the inner common characteristics of models components and models algorithm about phasic and phenological development, biomass accumulation, dry matter distribution and yield formation, organ built, plant-soil water dynamics and nutrient balance simulation. 【Conclusion】CSFF realized the knowledge level sharing the crop modeling concepts, processes, structures and methods, and could play a guiding role on designing the reusable crop model software architecture.

Key words: crop; simulation model; ontology; modeling framework; component framework; algorithm framework

0 引言

【研究意义】作物系统模拟包括模拟系统分析、模型算法构建和模型软件开发 3 项主要内容^[1]。研究

与提炼作物系统模拟通用框架, 有助于建模者在框架的引导下, 方便快捷地描述并整合各类建模资源, 进而为不同作物的模型构建、不同建模方法的集成与共享以及设计可重用的模型软件体系结构奠定基础。【前

收稿日期: 2008-04-21; 接受日期: 2008-08-20

基金项目: 国家“863”计划项目 (2006AA10Z219)、江苏省高技术项目 (BG2004320)

作者简介: 姜海燕 (1967—), 女, 浙江临安人, 副教授, 博士, 研究方向为作物系统模拟及智能系统、软件工程, Tel: 13952098112; E-mail: jianghy@njau.edu.cn. 通信作者曹卫星 (1958—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士, 研究方向为信息农业。Tel: 025-84396565; E-mail: caow@njau.edu.cn

人研究进展】Reynolds 等^[2]于 1989 年根据作物生长的基础生理生态过程建立了不同作物模型的通用算法,并按 C₃、C₄ 和 CAM 分别构建了作物模型通用结构,提出了植物模型的通用模块化设计^[3-4],方便了不同模拟思路之间的相互借鉴、替换与比较;但该方法预先固定了模型算法和结构,对建模需求变化的适应能力较弱。GePSi 模型^[4-5]采用面向对象方法,以类和类之间的关系表达作物系统的内外模拟框架,有效提高了模型软件的复用价值。Gauthier 等^[6]以作物器官为对象,结合作物生长的基础生理生态过程,形成了由作物模拟、作物形态和用户界面共 3 类框架组成的 GPSF 模型,对设计模拟系统的可复用软件框架具有指导作用;但该框架不便于建模者对子模型及模型算法的直接扩展。Wang 等^[7]将作物家族抽象为相互关联的 6 个层次,并结合作物生长过程建立了分层模拟框架 GMS,指导开发了 APSIM-GCROP 通用模型软件。FSE 建模工具^[8]根据作物建模流程和运算特点,形成了由初始化、动态算法和输出 3 部分组成的开放框架,用户采用 FST 语言可描述和构建作物模型及模拟系统。近年来,国内已构建了稻麦棉油等多种作物的模拟模型和基于模型的决策支持系统^[1],在数字农业中发挥重要作用。朱艳等^[9]提炼了小麦栽培管理知识模型框架,确立了作物管理知识模型系统通用设计与开发框架,提高了模型软件开发效率,花登峰等^[10]构建了禾谷类作物通用算法框架,指导开发了构件化作物管理决策支持系统。【本研究切入点】已有作物系统通用模拟框架^[2-10]以作物生理生态过程为基础,结合作物分类法和面向对象法加以构建,能够反映作物生长发育过程,但其共享程度多限于本研究小组的内部交流,对其他模拟框架的包容能力较弱,未能充分发挥通用概念在建模过程中的作用。此外,本体技术的发展为知识表示与共享提供了新的方法。The Plant Ontology Consortium 组织^[11-12](<http://www.plantontology.org>)采用本体方法统一了 Web 环境下植物生长发育以及形态出现的描述词汇,描述了植物生长发育过程,促进了植物数据库信息的集成与语义共享。【拟解决的关键问题】本研究拟将本体方法引入作物系统模拟领域,通过分析稻、麦、棉、油等作物的建模过程、模型算法及模拟系统,进而对作物系统模拟过程进行更高层次的抽象,形成可共享的作物系统模拟框架,为进一步建立面向用户、可重构的作物系统模拟软件体系结构奠定基础。

1 作物系统模拟框架的构建方法

作物系统模拟框架(crop system simulation framework, CSSF)是对作物系统模拟的高层抽象,由作物系统模拟共性概念、术语和关系组成,包括作物建模外部知识框架(crop modeling outer knowledge framework, CMOKF)和作物模型内部知识框架(crop modeling inner knowledge framework, CMIKF),可引导具体作物构建模拟模型。其中,CMOKF 反映作物系统模拟的整个流程,成为内部框架的驱动力;CMIKF 由作物生长组分框架与模型算法框架组成,反映作物自身的动态特征,本研究以领域本体为基础,通过构建仿真本体和作物模拟本体的集合,抽象作物系统模拟活动,构建作物系统模拟框架。

1.1 本体及领域本体

本体论原是哲学概念,后被人工智能领域用来描述事物的本质规律和属性,是新型的知识组织与表示方法,有助于解决知识共享与重用问题^[13]。Uschold 等^[14]认为“本体是人们对某些领域术语、问题解决框架的一致理解,常表现为概念集(包括实体、属性及其处理序列)、概念的定义以及概念之间的关系”。领域本体^[15]是对特定领域公认概念及概念间关系的精确描述,具有任务、概念、方法、应用等多种子本体类型,可由类、概念、实例、关系、函数和公理等元素构成,其中,属性关系(attribute-of)、部分与整体关系(part-of)、继承关系(is-a)和实例关系(instance-of)为基本关系。

1.2 仿真本体及作物模拟本体

仿真本体是作物系统模拟活动的基础性领域本体,包括时间、空间、环境、仿真活动、仿真方法、仿真状态和仿真任务共 7 类子本体。其中,仿真活动本体是作物系统建模和模型软件开发活动的总和,描述了时空环境下作物系统模拟活动的全过程,以及建模者在该过程中的主动行为和活动序列,主要包括学习活动、构模活动和评价活动(图 1)共 3 类。仿真活动具有开始时间、结束时间和持续时间、活动地点、活动对象名称等属性。开始时间与时间本体的时间点具有继承关系(is-a),持续时长与时间段具有继承关系(is-a),活动地点与位置空间的位置点具有继承关系(is-a),活动对象名称与名称空间的地名、品种名、作物名具有继承关系(is-a)。3 类活动之间拥有顺序关系,构模活动前的学习活动与之后的评价活动具有可传递性和可逆性。作物模拟本体(crop simulation

ontology, CSO) 是在学习及评价活动支撑下, 通过继承仿真本体完成作物模型的构建与开发, 是作物系统模拟中共享概念、关系、函数及实例的集合, 具体包括作物、资料、作物建模活动、作物模拟方法、作物模型和作物模型软件共 6 个子本体 (图 2), 作物建模活动本体继承仿真活动本体, 作物模拟方法本体继承仿真方法本体, 作物模型本体和作物模型软件本体继承仿真任务本体, 它们共同形成了各类作物系统的建模知识体系和通用建模流程。其中, 作物本体 (CO) 是作物学分类体系中概念及关系的集合 (图 3), 它继承仿真本体的时间段、位置点、名字空间和自然环境等属性。例如, 品种为扬麦 158 号的小麦是作物本体的具体实例。作物模型本体 (CMO) 由作物生长模型、形态建成模型和栽培管理知识模型等组成, 均

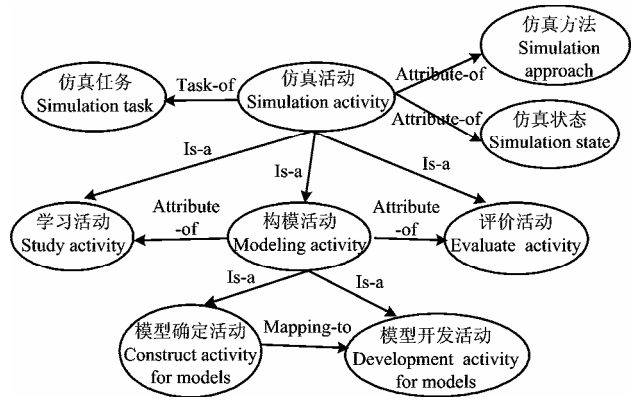


图 1 仿真活动本体的概念关系图

Fig. 1 The conceptual relation diagram of activity ontology for simulation

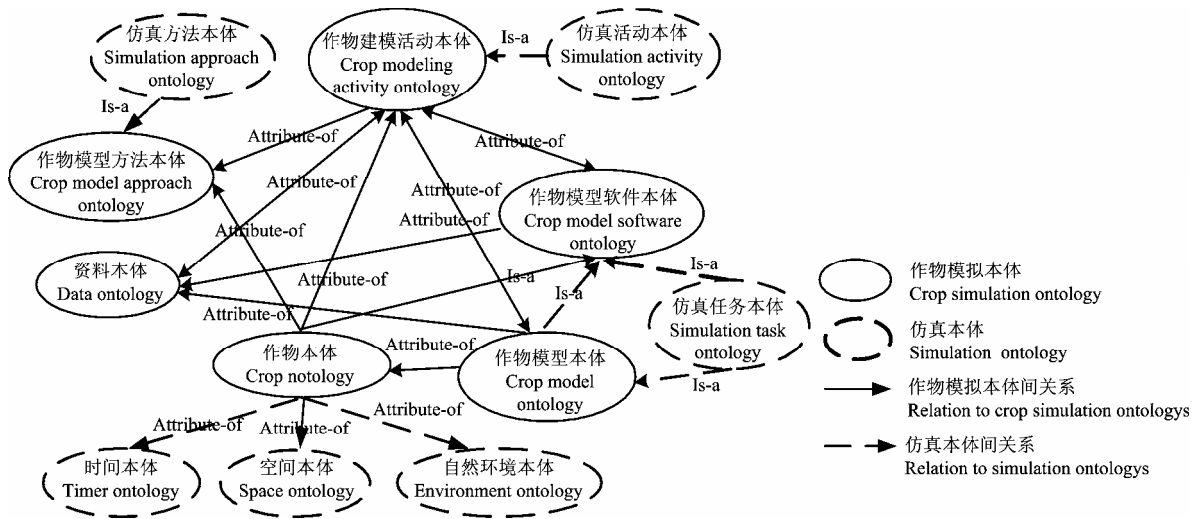


图 2 作物模拟本体中各子本体之间的关系图

Fig. 2 Relationships between sub-ontology within crop simulation ontology

具有模型结构、算法和参数等属性, 与时间、空间、自然环境、作物等本体集成可形成具体作物的概念模型。因此, 与作物本体集成可形成具体作物的概念模型。如: 小麦生长模拟模型是作物模型本体的实例, 可通过共性概念结合个性算法与参数来描述。其它子本体限于文章篇幅的限制, 不再叙述。

1.3 基于本体构建作物系统模拟框架的方法与流程

以作物系统模拟活动和仿真本体为基础, 基于作物模拟本体分析稻、麦、棉、油等作物系统建模流程和模型算法^[16-19], 分层次提炼公认概念、术语和关系, 构建 CSSF。其中, CMOKF 以作物系统模拟活动本体

为主线, 作物、资料、模拟方法等子本体相互协作而获得。CMIKF 基于作物生长规则和模拟模型组分, 结合作物模型子本体而构建, 它包括作物生育期、生物量积累、器官建成、物质分配与产量形成、作物-土壤水分动态和养分平衡等模型组分框架与模型算法框架 (图 4)。

2 作物建模外部知识框架

各类作物的建模思路、模型结构、模型算法和参数等均可相互借鉴。温光条件、土壤性状、栽培措施、品种特性等均是作物模拟模型构建的通用驱动因素,

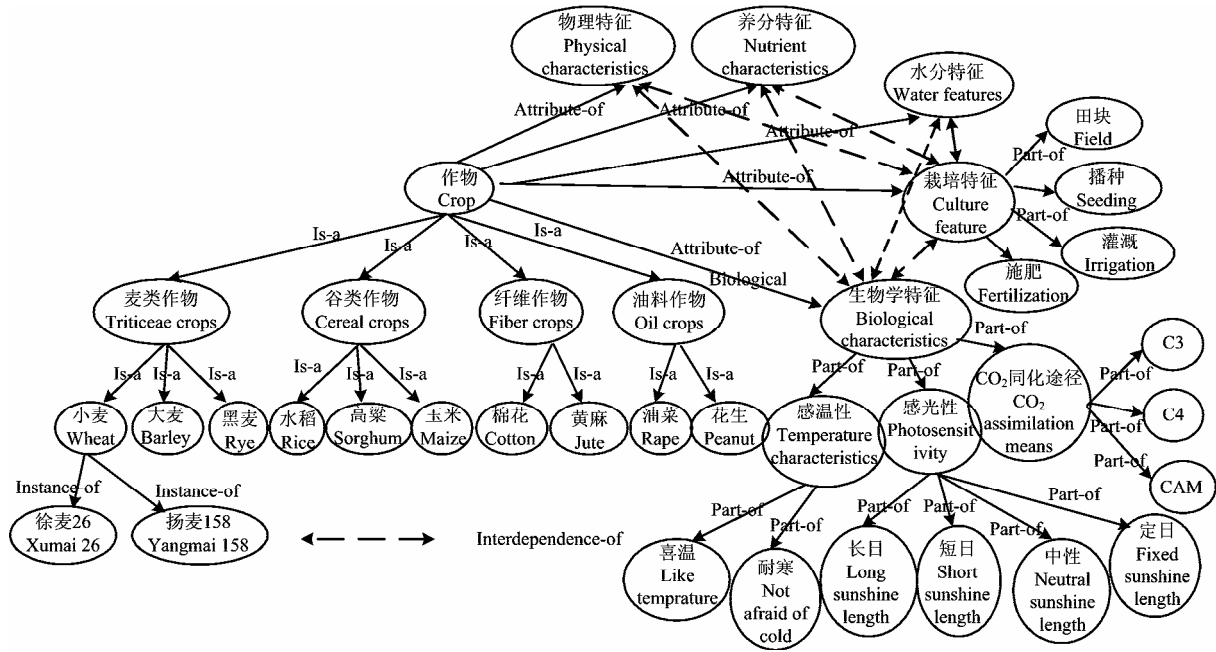


图 3 作物本体概念关系图

Fig. 3 The conceptual relation diagram of crop ontology

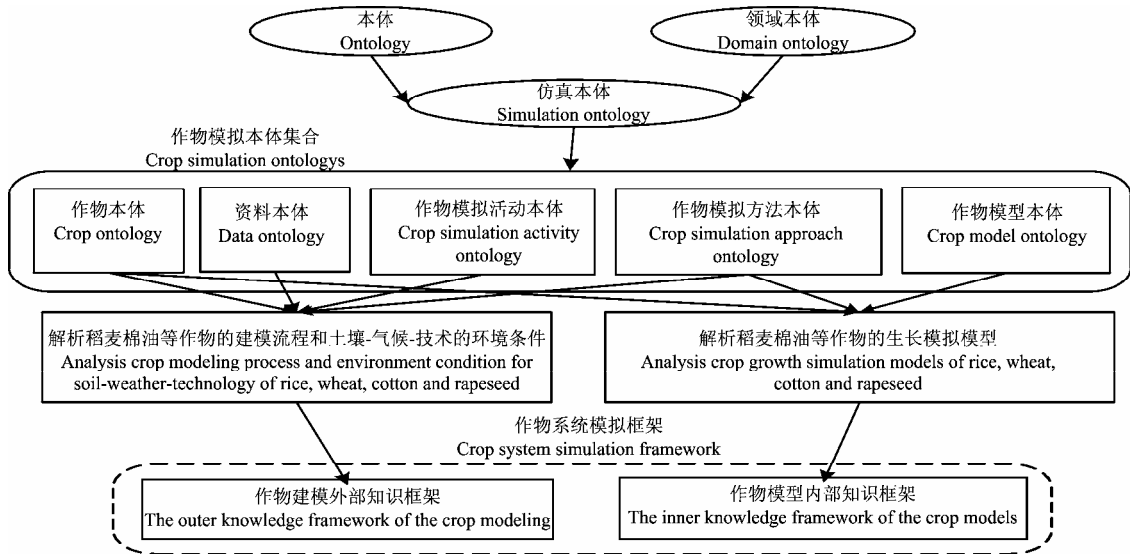


图 4 作物系统模拟框架的构建过程

Fig. 4 Construction process of crop system simulation frameworks

以此为基础，结合作物模拟本体可获得共性的 CMOKF，它由框架概念集和概念间制约与依赖的函数关系集。主要框架概念集的形式化描述如下（其中“<>”中为目标概念；“::=”表示目标概念定义为；“（）”

内的内容有序，“{}”内的内容无序；“，”分割宏观元素，“×”表示参数的笛卡儿集合，←表示依赖于。概念间关系的描述由于篇幅所限进行了省略）：
 <作物建模外部知识框架>::=（实验设计，大

田试验，确定作物模型算法，确定驱动数据，模拟运行，模型检验，模型软件开发)

<模拟运行> ::= (时间段, 驱动数据, 作物模型算法, 模拟结果, 模型评估)

<模型检验> ::= {敏感性分析, 校正, 核实}

<时间段> ::= {开始时间, 结束时间, 时间步伐}

<时间步伐> ::= {Time (日, 小时)}

<驱动数据> ::= {气象数据 × 土壤数据 × 栽培条件数据 × 模拟运行初始数据}

<气象数据> ::= {气象参数 × 时间段}

<气象参数> ::= {气象参数名称 × 气象参数值}

<气象参数名称> ::= {气温 × 日长 × 日照时数 × 日总辐射量 × 降雨量 × Var_W(i) ∈ 其它气象参数名称 | i=1,2,...,n}

<土壤数据> ::= {土壤参数名称 × 土壤参数值}

<土壤参数名称> ::= {土壤基本特性参数 × Soil(i,j) ∈ 分层理化性状参数 | i=1,2,...,m 土层数; j=1,2,...,n 土层参数个数}

<土壤基本特性参数> ::= {名称 × 类型 × 数据测定时间 × 土层数 × 土壤径流系数 × 裸土反射率 × Var_S(i) ∈ 其它特性参数 | i=1,2,...,n}

<分层理化性状参数> ::= {土层编号 × 厚度 × 土壤有机质含量 × 土壤容重 × Var_Slay(j) ∈ 其它分层理化性状参数 | j=1,2,...,n}

<栽培条件数据> ::= {栽培参数名称 × 栽培参数值}

<栽培参数名称> ::= {地点 × 纬度 × 播种深度 × 播种量 × 播种时间 × Var_P (i) ∈ 其它栽培参数名称 | i=1,2,...,n}

<模型运行初始数据> ::= {模型运行初始参数名称 × 模型运行初始参数值}

<模型运行初始参数名称> ::= {优先调用干物质分配模型 × 出苗当日生物量与播种量关系 × 出苗当日叶面积指数种子中的含氮量 × Var_R(i) ∈ 其它模型运行初始参数名称 | i=1,2,...,n}

<模型软件开发> ::= {模型表示, 模型实现, 系统设计, 系统实现, 开发工具, 软件测试}

3 作物模型内部知识框架

以作物模型本体为基础，分析小麦、水稻、棉花和油菜作物生长模拟模型^[14-17]的概念和关系后发现，

尽管不同作物系统具有各不相同的生理生态过程，但具有相似的生长发育规则、结构和属性。一般来说，作物生长模型由生育期、生物量积累、干物质分配、器官建成、作物-土壤水分动态和养分平衡等 6 类子模型组成。其中，生育期模拟中发育速率受温度（包括春化）和光周期控制。生物量模拟中的光合速率受到太阳有效辐射、温度、空气中 CO₂ 浓度、叶片中氮和水分状态的影响；而生物量积累取决于生长呼吸与维持呼吸，并受到生育期子模型中发育速率的直接影响。干物质分配模拟可以根据分配系数或分配指数模拟分配到作物不同器官中的生物量，其中叶面积受温度驱动，同时受总干物质积累量和各器官生物量的共同影响。器官建成模拟中器官发生的时间依赖于阶段发育进程，发生的大小及数量与碳同化物的分配与利用有关。此外，作物生长还受土壤中水分和氮素状况的影响，通过水分和养分胁迫因子影响作物生长发育过程。因此，它们的概念模型类似，但算法和参数各异，作物模型因而可分解为组分级和算法级 2 部分。作物模型组分框架为作物模型宏观概念与关系的集合，算法框架则是算法中共性概念与关系的集合。

3.1 作物模型组分框架的构建

作物模型组分可以由一些通用概念来表示，例如，生育期、物候期、光合作用、呼吸作用、干物质积累、干物质分配、器官建成等；模拟算法可由独立子模型、状态变量和过程函数组成，用于完成特定目标的模拟，这些概念的有序集合形成了作物模拟基础过程。不同作物模型的构建，实际上是相同或相似概念模型下不同算法的集合，它们使用的模式、模拟方法以及细化程度虽各不相同，但模拟目标一致，关键性概念及过程相似。因此，作物模型可以在通用概念结构的基础上，综合不同作物的个性算法和模型参数来实现。因而，作物生长模型组分框架是作物本体的继承，核心框架如下：

<作物模型组分框架> ::= GKM(名称, 作物模型组分结构, 模型组分算法, 模型组分参数, 关联)

<名称> = {标识, 名称表示模式}

<标识> = { GKM(i)+ 4 位数字; i=1,2,...,n }

<名称表示模式> = {符号, 自然语言}

<关联> = {← ∈ 顺序依赖, ∧ ∈ 与关系, ∨ ∈ 或关系}

<作物生长模型组分结构> ::=

{ GKM0001: 物候期预测, DEV;

GKM0002: 生物量积累, BIOMASS;

GKM0003: 干物质分配, PARTITION;
 GKM0004: 器官建成, ORGMAKE;
 GKM0005: 品质形成, QUALITY;
 GKM0006: 土壤-作物水分动态, WATER
 GKM0007: 土壤-作物养分动态,
 NUTRIENT}
 <模型组分算法> ::= {空}
 <模型组分参数> ::= {空}
 <作物生长模型组分关联> ::=
 {<DEV>←<DEV>
 <BIOMASS>←(DEV∧PARTITION
 ∨WATER∨NUTRIENT
 < PARTITION > ←(DEV∧BIOMASS
 ∧PARTITION) ∨WATER∨NUTRIENT
 < ORGMAKE > ←(DEV∧BIOMASS
 ∧PARTITION) ∨WATER∨NUTRIENT
 < QUALITY > ←(DEV∧BIOMASS
 ∧PARTITION) ∨WATER∨NUTRIENT
 }

3.2 作物模型算法框架的构建

在继承模型组分框架的基础上,分析小麦、水稻、棉花和油菜等作物生长子模型^[14-17],获得了作物生长通用算法框架。限于文章篇幅的限制,本文以生育期子模型为例,构建作物生育期模型算法框架,其他子模型算法框架的构建方法与此类似。

作物生育期模拟受到温度效应、光周期效应和春化效应的共同影响,不同作物对各类效应的反应程度不同。小麦受春化作用影响,水稻则没有春化作用;棉花不仅受气温影响,还受到土温和地膜覆盖等栽培措施的影响,但它们与气温之间存在定量的函数关系;油菜生育期与小麦类似,但模型参数值有差别。另外,作物生育期模拟的核心是量作物发育进程(development process),通过温度效应、春化效应及光周期效应的互作,再加上品种基因型参数的调节来实现。其中,生理发育时间(PDT)、有效积温(GDD)、发育速率(DVD)或发育指数等均可视为量化发育进程的不同指标。因此,生育期算法框架是作物模型本体的继承,并受到作物本体和作物模拟方法本体的共同影响,具有结构、算法、参数和关系几部分内容,核心描述如下:

<作物生育期模型框架> ::= { GKM0001: 生育期算法结构, 生育期模型算法, 生育期算法参数}
 <生育期算法结构> ::=

{ <温度效应>=GKM0001:001,DTE;
 <光周期效应>=GKM0001:002,RPE;
 <春化作用>=GKM0001:003,VP;
 <发育进程>=GKM0001:004,DVD|DVD
 ∈(PDT, GDD, NI 任一量);
 <物候期预测>=GKM0001:002,PHP
 }
 <生育期算法结构关联> ::= {(DTE∨RPE∨VP
 ∧DVD)∨PHP}
 <生育期模型算法> ::= {生育期模型算法描述,
 孩子算法(i)|i=1,2,...,m, 关联}
 <生育期模型算法描述> ::= {DEV,算法模拟方法,算法描述方式}
 <算法模拟方法> ::= {积温法,生理发育时间法,Way_DEV(i) ∈ 生育期模拟的其他方法
 |i=1,2,...,n}
 <算法描述方式> ::= {Ruler(i, j)×
 Express(i, j)|i=1,2,...,m;j=1,2,...,n}
 <生育期模型参数> ::= {模型输入参数,模型输出参数}
 <模型输入参数> ::= {气象参数×生育期品种参数×兄弟模型输入参数}
 <兄弟模型输入参数> ::= {空}
 <生育期品种参数> ::= {生育期品种参数模式×生育期品种参数值}
 <生育期品种参数模式> ::= {基因型品种参数模式×其它品种参数模式}
 <基因型品种参数模式> ::= {TS×PS×IE×FDF×PVT×To×Tb×Tm×Dev_V(i)
 ∈ 生育期模拟其它品种参数|i=1,2,...,n}
 <其它品种参数模式> ::= {Dev_O(i)|i=1,2,...,n}
 <模型输出参数> ::= {兄弟模型输出×内部计算输出参数}
 <兄弟模型输出> ::= {DTE,
 RPE,VP,CMBZ,PDT,GDD}
 <内部计算输出参数> ::= {Dev_Out(i)|i=1,2,...,n}
 <生育期参数关联> ::= {
 <DTE>←{气温×TS×Var(i)∈其它参数
 |i=1,2,...,n}
 <RPE>←{气温×日长×PS×Var(i)∈其它
 参数|i=1,2,...,n}
 <GDD>←{气温}

$$\langle VP \rangle \leftarrow \{ \text{气温} \times PVT \times \text{Var}(i) \in \text{其它参数} \mid i=1,2,\dots,n \}$$

$$\langle PDT \rangle \leftarrow \{ DTE \times RPE \times VP \times IE \times FDF \times \text{Var}(i) \in \text{其它参数} \mid i=1,2,\dots,n \}$$

$$\langle PHP \rangle \leftarrow \{ PDT \times GDD \times \text{Var}(i) \in \text{其它参数} \mid i=1,2,\dots,n \}$$

}

其中, TS、PS、IE、FDF、PVT 分别代表温度敏感因子、光周期敏感因子、基本早熟性、基本灌浆因子和生理春化时间。

4 讨论

已有的作物模型通用结构和算法框架^[2-8]多建立在面向对象技术之上, 没有将概念与对象加以分离, 模拟软件的适应性与可扩展性均有一定限制。本研究基于本体方法分析了作物系统模拟活动和作物生长模型, 提炼和抽象共性概念和关系单元, 初步构建了作物系统模拟框架(CSSF), 弥补了面向对象方法在作物生长分析方面的缺陷。虽然, 本体方法与面向对象方法在作物系统模拟分析上非常相似, 但本质上不同, 主要体现在:

(1) CSSF 具有更强的知识表达能力。面向对象方法构建的框架^[4-7]虽然通过基类、派生和重载等手段能够实现知识共享, 但与具体语言有关, 对象和对象之间的相互关系难以表达。本体方法构建的模拟框架是共性概念及关系的集合, 具有语言无关性, 可形成作物系统模拟知识地图, 更加方便作物系统模拟的知识级共享。

(2) 可重用性和可管理性增强。面向对象方法构建的模拟框架可实现构件级复用, 但随着对象数量的增多而难以控制与管理; CSSF 是高层概念及关系的抽象, 可包含多个对象, 构件粒度大, 促进了作物系统模拟由外到内、自上而下分层概念及概念之间关系的有效融合, 可扩展性加强; 此外, CSSF 由概念和关系元素组成, 可进一步映射为软件元素, 因而可重用性和可管理性增强。

(3) 具有更好的语义基础和更广泛的应用价值。CSSF 具有层次化特性, 概念及其关系可用形式化方法加以精确描述, 语义明确清晰, 有利于实现基于本体的概念级检索, 也为作物系统本体库的构建积累资产, 这些特点均是面向对象框架所不具备的。

目前, 本研究尝试应用本体方法分析作物系统并构建模拟框架, 但在框架的完整性及精确性等方面尚

需不断完善, 同时也需进一步探讨作物模拟本体和基于本体的框架表示方法。

5 结论

5.1 将本体方法引入作物系统模拟领域, 以作物生长的基础生理生态过程为主线, 通过综合分析稻麦棉油等作物的建模过程、模型算法及模拟系统, 分层次建立了仿真和作物模拟本体集合。

5.2 以作物模拟活动本体为主线, 作物、资料、模拟方法和模拟任务等本体相互协作, 提炼了作物外部知识框架; 基于作物生长规则和模拟模型组分, 结合作物模型本体、作物本体和作物模拟方法本体, 构建了作物生育期、生物量积累、器官建成、物质分配与产量形成、作物-土壤水分动态和养分平衡等子模型内部组分与算法框架。

5.3 作物系统模拟框架具有概念化、可重用、可扩展、可管理及语言无关性等特点, 提升了作物模型的共享与重用价值, 为指导其它作物系统建模以及设计可重用的作物系统模拟软件体系结构奠定了基础。

References

- [1] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 高等教育出版社, 2000: 11-13.
Cao W X, Luo W H. *Crop System Simulation and Intelligent Management*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 11-13. (in Chinese)
- [2] Reynolds J F, Acock B, Dougherty R L, Tenhunen J D. A modular structure for plant growth simulation models // Pereira J S, Landsberg J J. *Biomass Production by Fast-Growing Trees*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989: 123-134.
- [3] Reynolds J F, Acock B. Modularity and genericness in plant and ecosystem models. *Ecological Modelling*, 1997, 94: 7-16.
- [4] Acock B, Reynolds F. Introduction: modularity in plant models. *Ecological Modelling*, 1997, 94: 1-6.
- [5] Chen J L, Reynolds J F. GePSi: a generic plant simulator based on object-oriented principles. *Ecological Modelling*, 1997, 94: 53-66.
- [6] Gauthier L, Gary C, Zekki H. GPSF: a generic and object-oriented framework for crop simulation. *Ecological Modelling*, 1999, 116: 253-268.
- [7] Wang E, Robertson M J, Hammer G L, Carberry P S, Holzworth D, Meinke H, Chapman S C, Hargreaves J N G, Huth N I, McLean G. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy*, 2002, 18: 121-140.

- [8] van Kraalingen D W G, Rappoldt C, van Laar H H. The fortran simulation translator, a simulation language. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18: 359-361.
- [9] 朱 艳, 曹卫星, 田永超, 王其猛. 作物管理知识模型系统设计与开发框架研究. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 138-142.
Zhu Y, Cao W X, Tian Y C, Wang Q M. Framework for design and development of knowledge model system for crop management. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4): 138-142. (in Chinese)
- [10] 花登峰, 刘小军, 汤 亮, 朱 艳, 曹卫星. 基于构件化生长模型的作物管理决策支持系统. *南京农业大学学报*, 2008, 31(1): 17-22.
Hua D F, Liu X J, Tang L, Zhu Y, Cao W X. Growth model and components based decision support system for crop management. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2008, 31 (1): 17-22. (in Chinese)
- [11] Jaiswal P, Avraham S, Ilic K, Kellogg E A, McCouch S, Pujar A, Reiser L, Rhee S Y, Sachs M M, Schaeffer M, Stein L, Stevens P, Vincent L, Ware D, Zapata F. Plant ontology (PO): a controlled vocabulary of plant structures and growth stages. *Comparative and Functional Genomics*, 2005, 6: 388-397.
- [12] Pujar A, Jaiswal P, Kellogg E A, Ilic K, Vincent L, Avraham S, Stevens P, Zapata F, Reiser L, Rhee S Y, Sachs M M, Schaeffer M, Stein L, Ware D, McCouch S. Whole-plant growth stage ontology for angiosperms and its application in plant biology. *Plant Physiology*, 2006, 142: 414-428.
- [13] Gruber T R. A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(2): 199-220.
- [14] Uschold M, Gruninger M. Ontologies: principles, methods and applications. *The Knowledge Engineering Review*, 1996, 11(2): 93-155.
- [15] 陈 刚, 陆汝钤, 金 芝. 基于领域知识重用的虚拟领域本体构造. *软件学报*, 2003, 14(3): 350-355.
Chen G, Lu R Q, Jin Z. Constructing virtual domain ontologies based on domain knowledge reuse. *Journal of Software*, 2003, 14(3): 350-355. (in Chinese)
- [16] 刘铁梅. 小麦光合生产与物质分配的模拟模型[D]. 南京: 南京农业大学, 2000: 16-89.
Liu T M. Simulation on photosynthetic production and dry matter partitioning in wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2000: 16-89. (in Chinese)
- [17] 孟亚利. 基于过程的水稻生长模拟模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2002: 23-73.
Meng Y L. A process-based simulation model for rice growth[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2002: 23-73. (in Chinese)
- [18] 张立帧. 基于过程的棉花生长模拟模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003: 14-19.
Zhang L Z. A process-based simulation model for cotton growth and development[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003: 14-19. (in Chinese)
- [19] 汤 亮. 油菜生长模拟与决策支持系统研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 24-68.
Tang L. Study on rapeseed growth simulation and decision support system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006: 24-68. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)