产量形成为基础建立模型，利用牧草器官生长与发育进程和环境因子之间的关系，以生理发育时间为尺度来描述各器官分配指数的动态变化，进而以分配指数来预测总干物质在牧草各器官间的动态分配，通过计算分配到各器官的干物质量来预测产量形成。第五，以水分平衡为基础建立模型，根据土壤水分平衡的原理，不仅考虑因地下水位较浅而引起毛管上升水量和土壤导水率变化对土壤含水量变化的贡献，还通过干旱胁迫影响因子和渍水胁迫影响因子，模拟干旱和渍水对作物生长发育的影响，建立与牧草生长模型相耦合的土壤水分动态子模型。在这类模型中，干旱胁迫影响因子取决于土壤临界水分含量，渍水胁迫影响因子的算法不仅考虑了作物不同种类、土壤含水率高低引起的渍害差异，还考虑了渍水时间和不同生育阶段渍水敏感性差异等因素。第六，以养分平衡为基础建立模型，主要是根据牧草对氮、磷、钾三大养分的动态需求，建立模拟模型。

2. 气象因子模型

采用已有的方法构建气象因子模型（曹卫星和罗卫红，2000），降水因子模型由马尔可夫链（Markov Chain）模拟逐日降水出现与否，然后用 Gamma 分布函数来描述逐日降水量，并作为单一的独立随机变量处理。日最高气温、日最低气温和日照时数的模拟是利用波谱分析方法生成参数，并把气温和太阳辐射的日变化过程视为弱平衡随机过程进行模拟。

二、基于知识规则的草地管理决策支持系统

基于知识规则的草地管理决策支持系统是以现有草地管理的技术和知识，以及相关区域内草地形成和发展的因素为基础，通过建立决策问题解决方案的知识产生式规则和框架，具有可以自动遴选相关知识，自动进行处理和计算，并形成解决决策问题的方案或规划的人机系统。该系统主要由两部分组成，一部分是开发环境，另外一部分是运行环境（牛贞福，2004）。

开发环境部分主要由三个模块组成，首先是知识来源，这种知识既可以来源于长期关于草地管理和建设已有的各种科研成果，如论文、专著、专利和专家经验等知识，又可以是网络数据平台上的各种信息源。其次是知识获取机，包括知识发现、数据挖掘、机器学习和专家会谈，其中知识发现主要是将各种类型的知识，按照某个标准和需求，按照统一标准归类存储，以便计算机系统能够及时方便地获取；数据挖掘指计算机将输入的原始数据，根据设定的模型运算公式，进行自动计算而形成的衍生数据的过程；机器学习指计算机系统根据已有运算过程及输入和输出的经验，形成的默许记忆，当再次调动该数据过程时，计算机系统根据自己的记忆将已有过程和经验作为一个案例输入，以供决策者选择，通过机器学习，能够加快数据运算和计算过程，缩短结果输出时间；专家会谈指计算机系统在知识发现过程中，不同数据源处理解决同一决策问题时，出现结果分异或相悖时，需要根据专家知识帮助计算机系统遴选合理的数据源。最后是知识库，知识库主要包括产生式规则、框架和语义网络，其中产生式规则主要指数据运算的算法和标准；框架指解决决策问题过程时需要遵守的程序和标准；语义网络指有些知识需要通过计算机语言或编码表达。

运行环境包括人机接口、事实修改和推理机三个模块。人机接口也称多媒体人机交互系统，主要用于用户输入命令和输入结果。事实修改主要是根据输入命令，激活计算机系统已有的规则，获取求解结论，若输入结论不能满足用户需求时，需要修改输入命令或精细化输入命令，然后再次获取求解结果。推理机指计算机系统根据用户命令，搜索激活规则，通过冲突消解，遴选计算机系统认为最优的规则。

基于知识规则的草地管理决策支持系统结构如图 9-3。

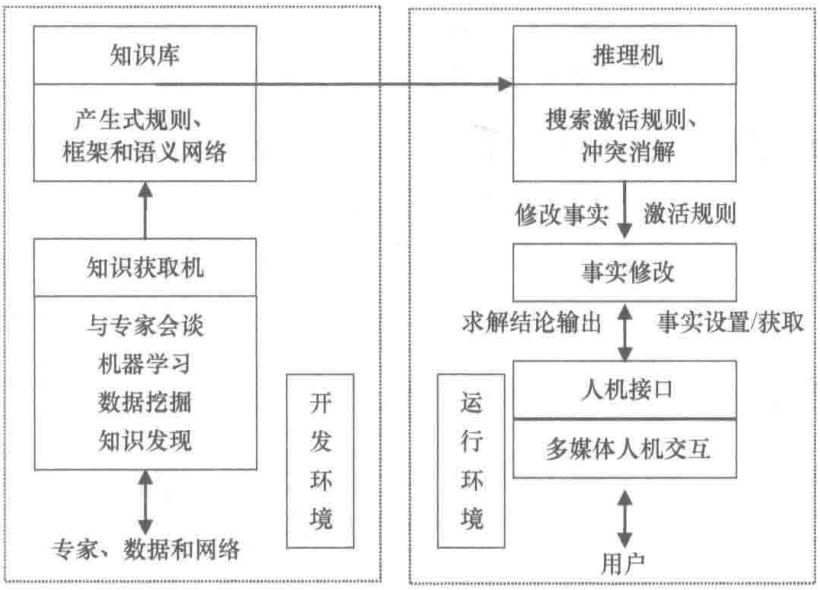


图 9-3　基于知识规则的草地决策支持系统结构图（引自牛贞福，2004）

三、基于知识模型的草地管理决策支持系统

基于知识模型的草地管理决策支持系统是依据有经验人员或专家的权重赋值，从而预测不同参数的重要性，实现草地管理过程中问题的决策。其决策过程为草地管理者提出需要决策的问题，然后对该问题包括的各种参数及其意义进行规范，提出产生式规则和框架，明确问题咨询的方式，如面谈、邮件、信件或电话等方式，最后通过专家对相关问题的回答和赋值，获取相关知识，将从专家那里获取的知识输入人机系统，通过计算机系统的推理机，获取解决方案。若该方案不能满足需求，再修改知识产生式规则或框架，再次获取专家知识，再通过人机系统推理机获取解决方案，一直到获取满意解决方案为止。修改产生式规则和框架时，不是全部重新定义产生式规则和框架，而是对前次产生式规则和框架的精炼与提升。

基于知识模型的草地管理决策支持系统主要由知识模型库、数据库、专家咨询库和人机界面等部分组成（图 9-4）。

模型知识库是通过综合分析、提炼田间试验、专家知识和文献资料，将其内在规律进一步量化，然后通过建模而构建的。在复杂巨系统的研究中全部定量化有明显的优越性，但作物生产系统的特点决定了这只能是理想化，是不现实的。因此，在广泛收集和量化专家知识与经验时，还需要对那些暂时无法量化但能够辅助草地管理的内容以规则形式存放在知识规则库中，用户可以利用人机界面选取相关知识规则进行专家咨询和辅

助决策，这样使标准变得更加完善与合理。

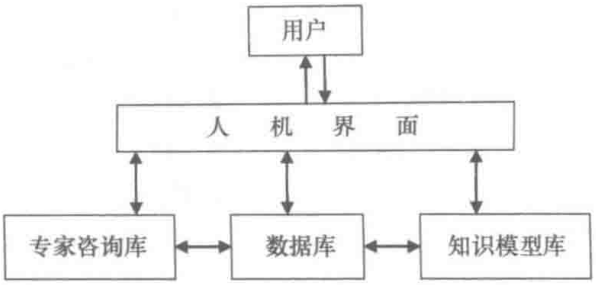


图 9-4 基于知识模型的草地管理决策支持系统（引自郭银巧等，2006）

数据库由数据及数据库管理系统组成，数据主要有气象、草地植被、土壤等数据。

该类系统可以实现产前设计、产中管理的定量决策，包括产量与品质目标的确定、人工草地播前方案设计、天然草地管理、适宜生育期的预测、动态生育指标的量化和系统维护等功能。

四、基于知识模型和生长模型的草畜管理决策支持系统

基于知识模型和生长模型的草畜管理决策支持系统将草畜管理知识模型、牧草生长模拟模型、家畜生长模拟模型及家畜与草地管理智能系统等按照一定的原理进行有机的耦合与集成，达到预测与决策功能的统一，提供“在哪里、种什么草、怎么种、养什么畜、怎么养、草畜如何平衡等”决策信息。系统由数据库、模型库（知识模型和生长模型）、方法库、知识库、推理机和人机接口等部分组成（图 9-5）。

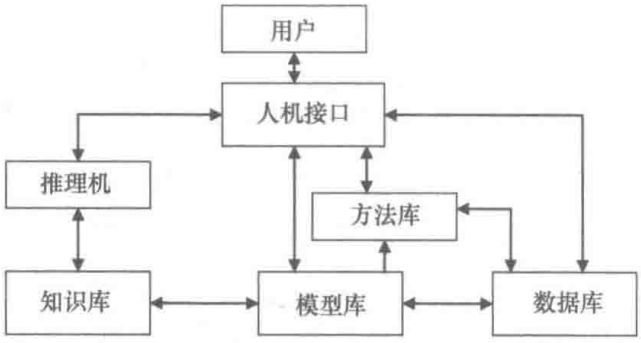


图 9-5 基于知识模型和生长模型的草畜管理决策支持系统（引自朱艳等，2004）

（一）数据库

系统数据库由基础数据及创建、存取和维护数据的数据库管理系统组成。

1. 草地数据

主要包括气候、地形、土壤、水文、草地、家畜、土地利用、行政分区、社会经济、综合信息等基础背景空间数据库。

气象数据：存储牧草生长季节的主要气象数据。包括决策点的日最高气温（℃）、日最低气温（℃）、日照时数（h）或日辐射量（MJ/m^2）、日降水量（mm）等。

土壤数据：存储反映土壤性质的数据。包括土壤 pH、物理性黏粒含量（%）、容重（g/cm^3）土壤水分和养分状况[包括土壤实际含水量（%）、有机质含量（g/kg）、全氮含量（g/kg）、矿化无机氮含量（mg/kg）、速效磷含量（mg/kg）、速效钾含量（mg/kg）及盐分含量（%）等]。

草地数据：存储反映植被状况的数据。包括植被盖度（%）、高度（cm）、生产力、季节放牧利用、草地资源类型等。

草地管理数据：主要存储常规草地管理措施数据。

2. 家畜数据

家畜动态：种类与数量、存栏率、出栏率、理论载畜量及合理的畜群结构等。

3. 草畜平衡

饲料供给量、家畜需求量等。

（二）模型库

模型库是存储模型和表示模型的计算机系统。该决策系统的模型库主要包括草地管理、家畜管理及草畜平衡的知识模型和牧草、家畜生长模拟模型两大模型，也就是说，主要包括草地管理知识模型、家畜管理知识模型、草畜平衡知识模型、牧草生长模型、家畜生长模型。

（三）知识库

知识库主要存放草畜管理知识系统中某些定性的、目前无法用模型定量表达的技术性知识。

（四）方法库

方法库主要包括知识模型和生长模型耦合与集成的方法。

（五）推理机

推理机根据当前输入的数据，利用知识库中的知识，按一定的推理策略，去解决实际问题。推理机与知识库分离是系统透明性和灵活性的保证。

（六）人机接口

系统以 Windows 为界而，通过下拉菜单、工具条、图标、图形和表格等与用户进行交互，整个操作只要通过简单的鼠标点按或键盘敲击即可完成。

第三节　草业决策支持系统的应用案例

本节主要介绍国内外2个比较成熟的草业决策支持系统案例，包括每种系统的功能、结构和作用，国外介绍了澳大利亚的 GrazFeed 模型，国内介绍了草畜平衡管理系统。

一、澳大利亚 GrazFeed 智能决策支持系统

20 世纪 90 年代中后期，澳大利亚在 GrazPlan 项目（http://www.grazplan.csiro.au/）资助下正式发布了 Windows 版本的 MetaAccess、LambAlive、GrassGro、GrazFeed 等软件，广泛应用于家庭牧场的研究和管理。21 世纪以来，国外开发的家庭牧场管理系统得到不断丰富和广泛使用，在放牧草场 P、N、S 及 C 的原型模型研究、耕牧混合农作系统优化管理系统（如 GrazPlan 的 FarmWi$e）、智能决策支持系统的开发等方面取得了良好进展。其中，GrazFeed 模型是一种智能决策支持系统，用于放牧家畜管理的简单化软件，由澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）研发，主要用于放牧家畜的饲养方案决策，核心是为牧民或农场主提供最佳的草地利用方案，减少对昂贵饲料的依赖（Feiwel，1968），若当必须添加补饲时，则选用高效的补饲料，一方面实现草地的合理利用，另一方面让牧民或农场主获取最大的边际效益，从而提高牧民或农场主的收益。GrazFeed 适合于任何类型的草地，但是不适合以灌木或稀有种为主的天然草地，该软件适合于任何品种的羊和牛。

1. GrazFeed 的结构

该决策支持系统的基本框架分为三个部分，首先是家畜或饲养动物的现状，其次是饲草料供给部分，最后是家畜采食后的表现（图 9-6）。因此应用该决策支持系统时首先要了解草地和家畜的基况，系统会根据草地基况来预测家畜生产量，并预测添加补饲后家畜生产可能提高的幅度。系统中各家畜品种的生物功能等参数是按成年体重来设置的，主要依据澳大利亚反刍家畜喂养标准，目的是通过简易方法预测家畜采食量及其对能量和蛋白质的需求。家畜潜在采食量主要依据它的成年质量、发育阶段及泌乳阶段（如果有的话）的需求，首先，考虑家畜从草地可获得的潜在采食比例，即根据牧草质量、高度与质量占选择性放牧和给家畜提供补饲料的比例；其次，扣除为维持、妊娠及因为

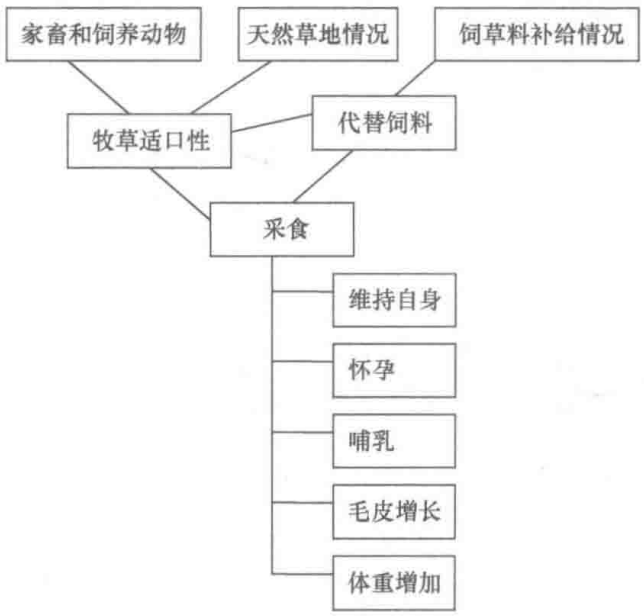


图 9-6　GrazFeed 智能决策支持系统结构图（仿李刚，2006）

寒冷产热的任何能量生产之后，GrazFeed 可根据总代谢能和蛋白质的摄取预测家畜的生产力（质量的改变，毛的生产，奶的生产或未断奶的幼体获得的质量）；最后，使用者不仅可以检测不同级别补饲料的效果，还可以根据生产目标确定补饲料的使用量。程序运行结果可为生产提供建议，根据家畜生产的主要营养限制因子为使用者提供选择。

2. GrazFeed 决策支持系统需要的资料

该系统需要输入气象、草地、家畜等方面的数据，主要包括：①气象条件，涉及最低温度、最高温度、平均日降水量、平均风速等资料。②草地供给能力方面，需要输入草地类型、产量、干物质消化率、粗蛋白含量、草层高度和盖度等与草地初级生产力相关的信息。③家畜和饲养动物现状指标方面，需要输入家畜及饲养动物种类（品种），以及不同家畜在不同年龄段时的体重、产毛量、产肉量、产毛率、产肉率等指标；随着家畜和饲养动物种类和品种的差异，这些指标值是不一样的，一般为某一个地区家畜或饲养动物的平均值，需要通过实验获取；同时需要输入家畜或饲养动物的饲喂信息。④不同产品的市场价格。⑤饲草料供给部分需要输入的参数，包括补饲饲料的种类及其营养成分等信息。

不同地区或同一地区不同草地类型的初级生产力受降水、温度、日照和土壤条件的协同影响，因此草地牧草的营养成分差异较大，而营养成分对不同种类家畜的健康生长、发育、繁殖及畜产品种类的数量和质量具有重要的影响。基于上述考虑，GrazFeed 决策支持系统的参数中考虑了影响草地生长及牲畜繁殖、生长发育的各种必要的因子，本质上将草地营养供给能力与放牧家畜营养需要进行有机联系，将草地营养供给特点与家畜生产的肉、毛、乳之间的关系合理配置，实现家畜或饲养动物健康生长发育的智能决策，为牧民或农户合理配置饲料、畜种和放牧时间提供最佳选择方案，实现草地合理利用的同时，保证家畜或饲养动物体重的正常增长，并增加牧民或农场主的经济效益。

3. GrazFeed 决策支持系统的使用

GrazFeed 由表格组成的主菜单驱动：从 Info 开始到 Feeding 结束。菜单上的每个选项有一个对话框，可输入相应信息。

每个对话框的信息输入有两条途径：点击区域或由键盘输入，并覆盖原有的数值。

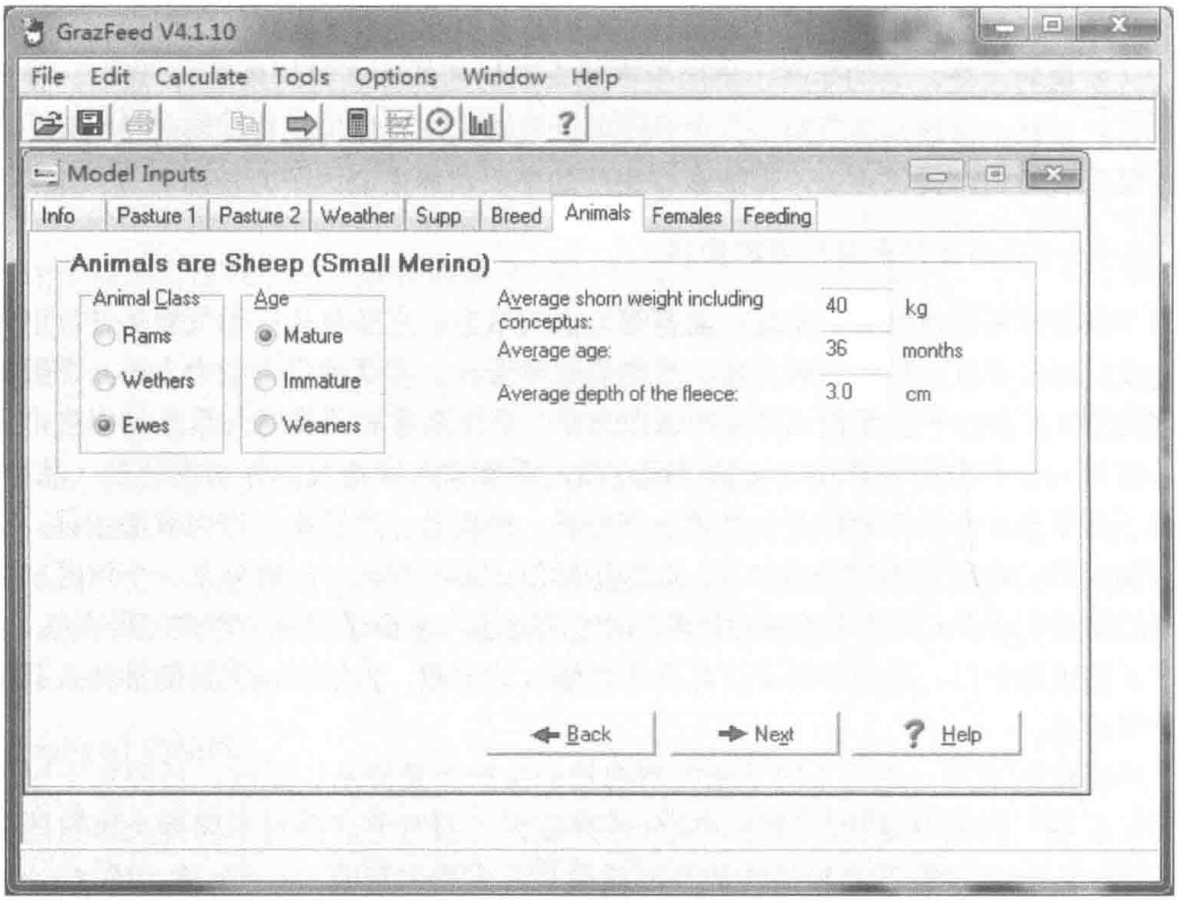
例如：草地产量和家畜，年龄，高度，组成百分比，从“Combo”对话框中：点击箭头，从列表显示中选择。

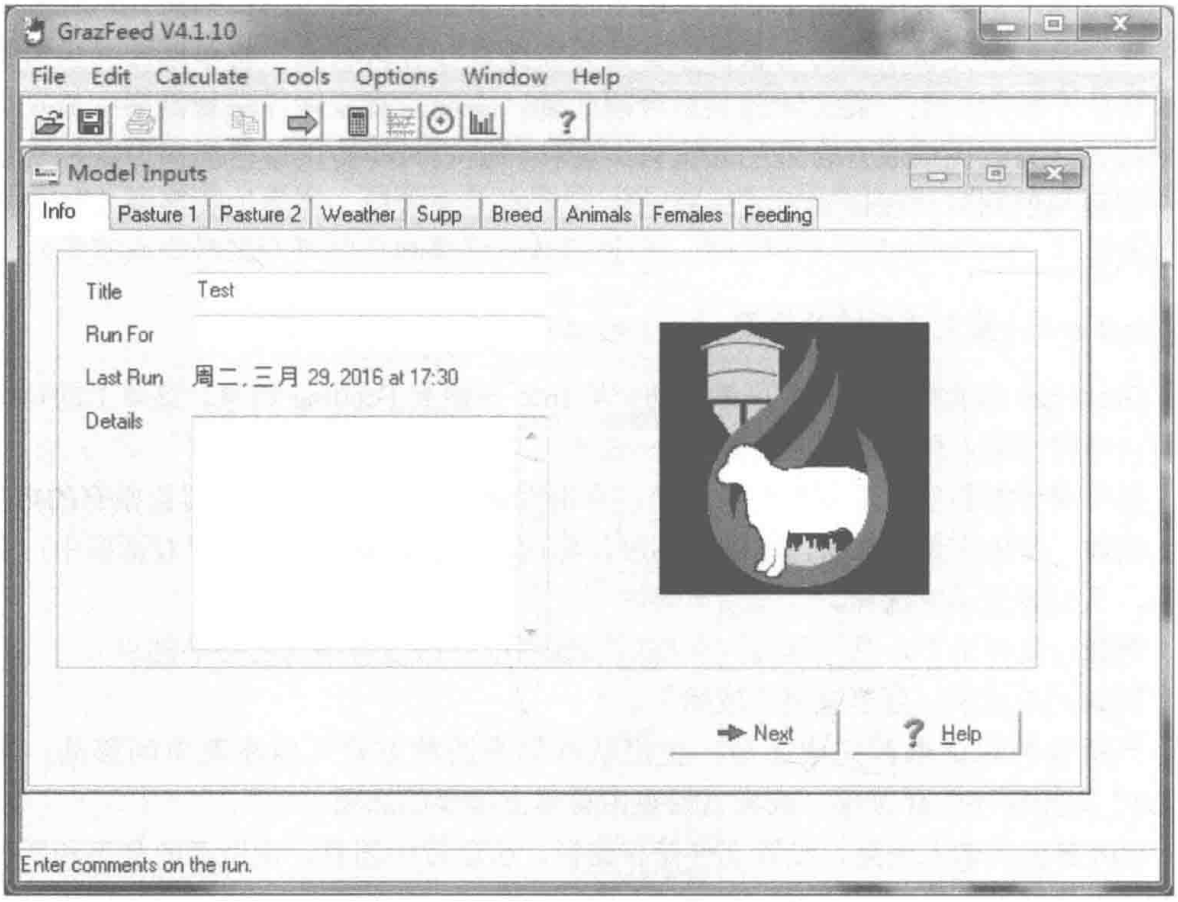
例如：品种类型，月，体况，从提供的选项中点击适合项（实心小圆点）。

例如：羊或牛，公羊或竭羊或母羊。

当所有的对话框都完成之后，使用鼠标键有两种方式可以在菜单间移动：通过“Next”键按顺序选择菜单，或者直接点击菜单上需要的选项。

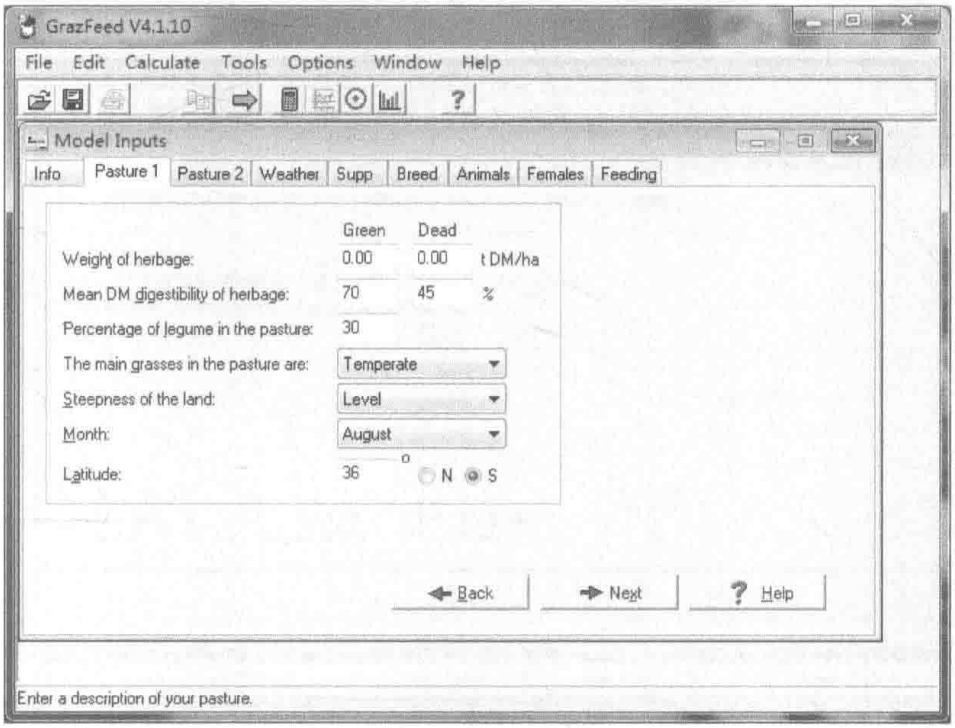
Info 界面：输入信息，设置文件储存路径。所运行的题目，使用者的名字和所做测试的详细情况。



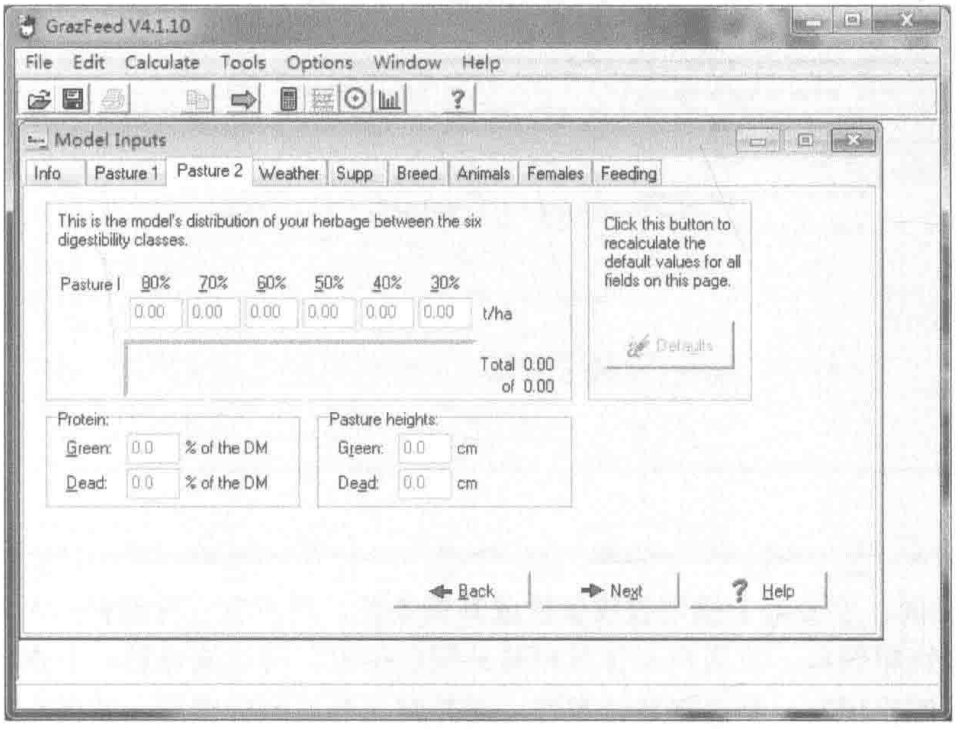


Pasture 1 界面：草地描述情况（牧草产量，干草状态下绿色部分和枯死部分平均消

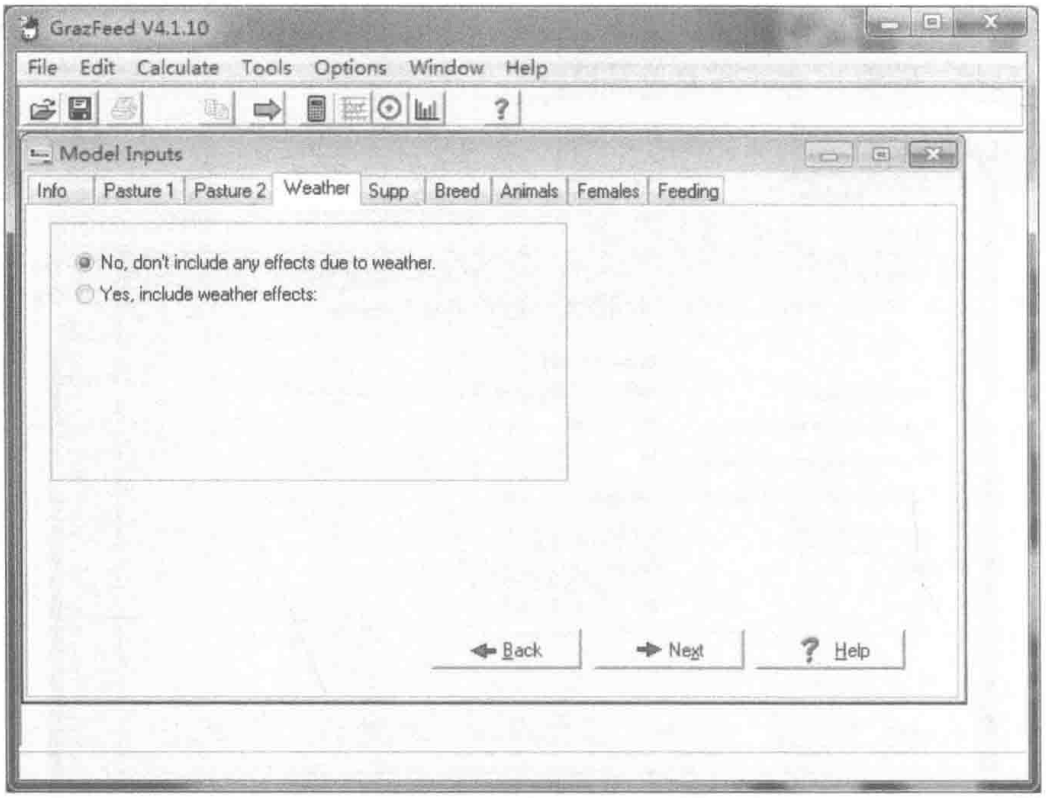
化率、豆科牧草比例）、草地主要类型（温带、热带）、牧场坡度状态（水平、平缓、波动、适度陡峭、陡峭），纬度信息及月份。

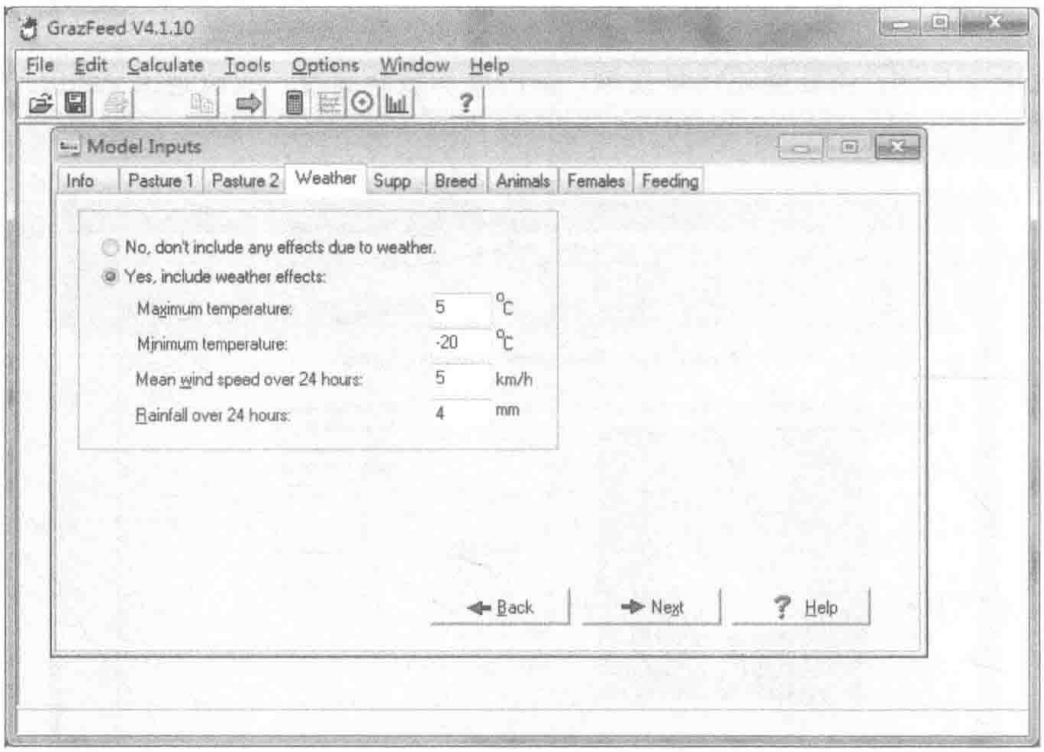


Pasture 2 界面：主要描述牧草质量、蛋白质和牧草高度，数值是由 Pasture 1 输入计算得来的。



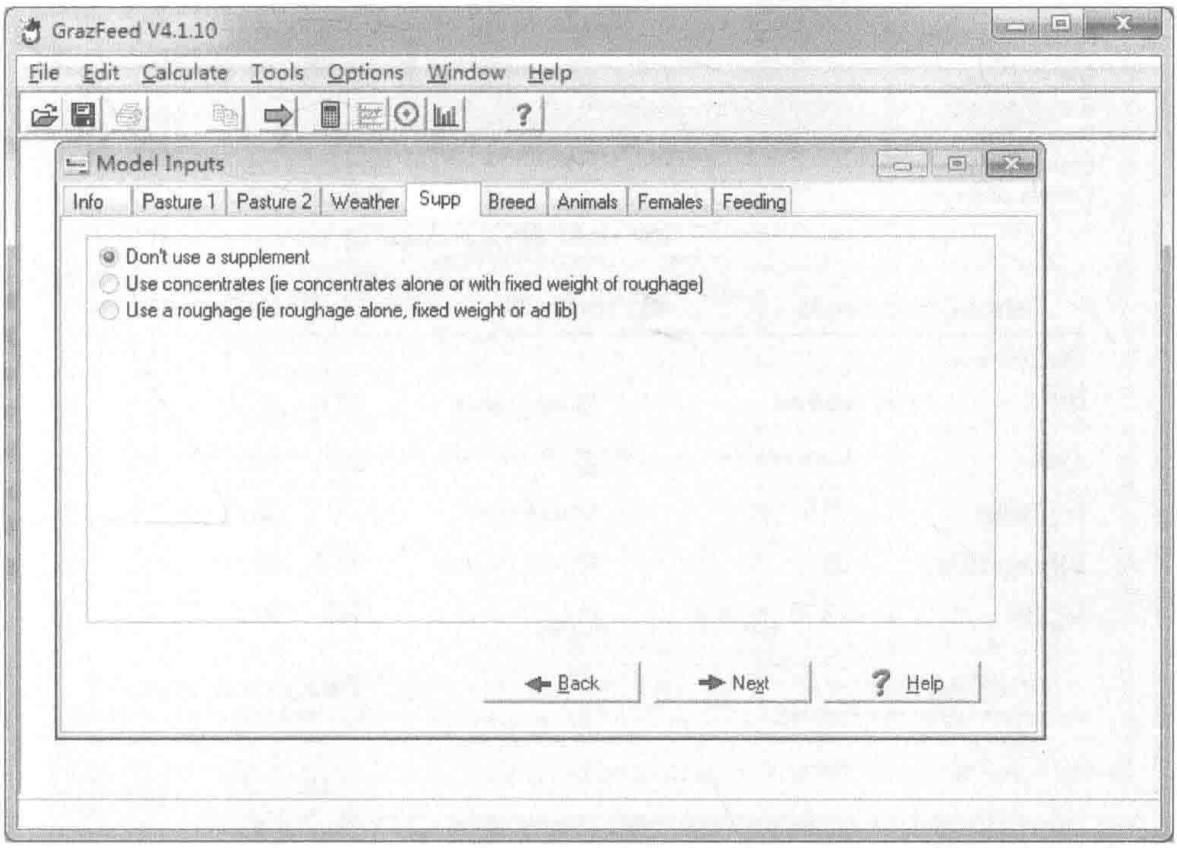
Weather 界面：主要询问是否考虑天气影响，若考虑天气影响，则在对话框中输入预计温度、平均风速和 24 小时之内的降雨量。若不需要，则不需要输入任何资料。

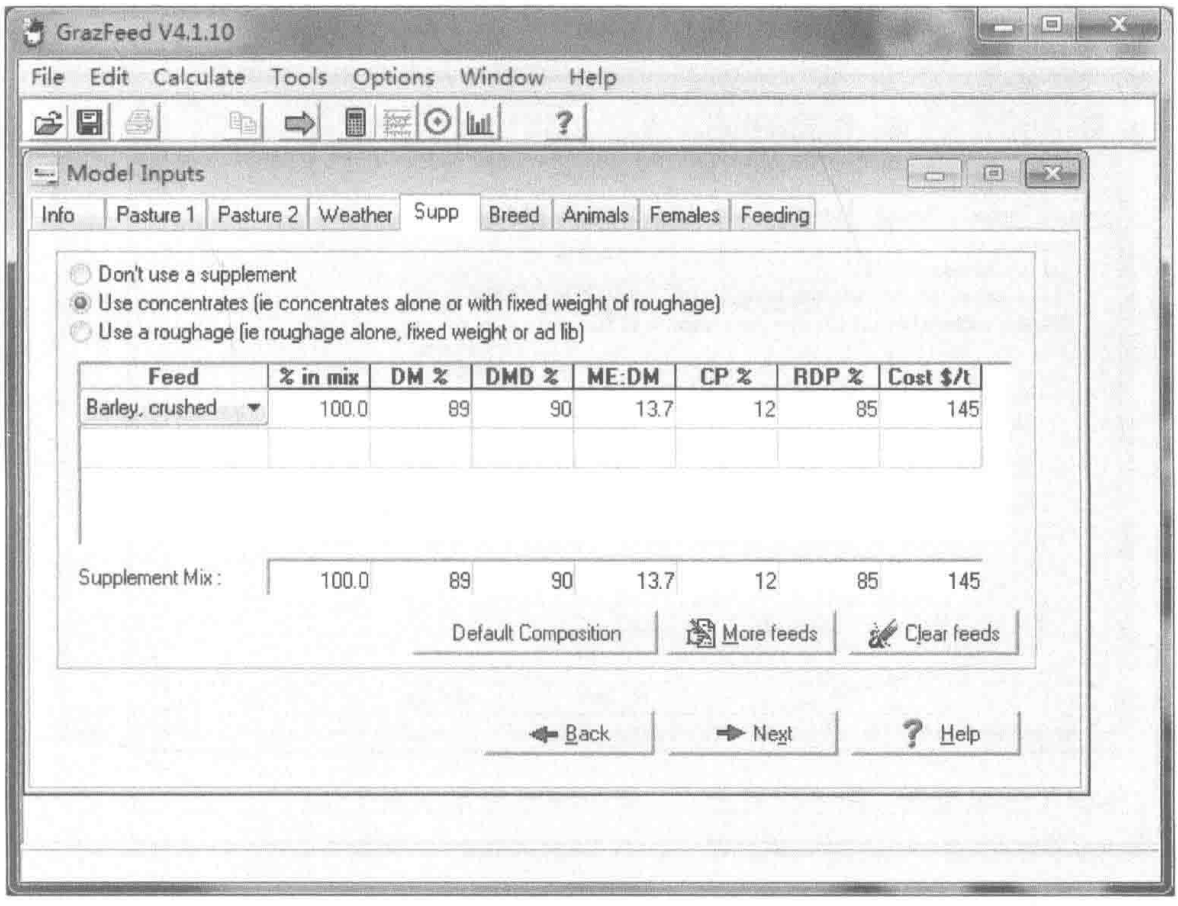




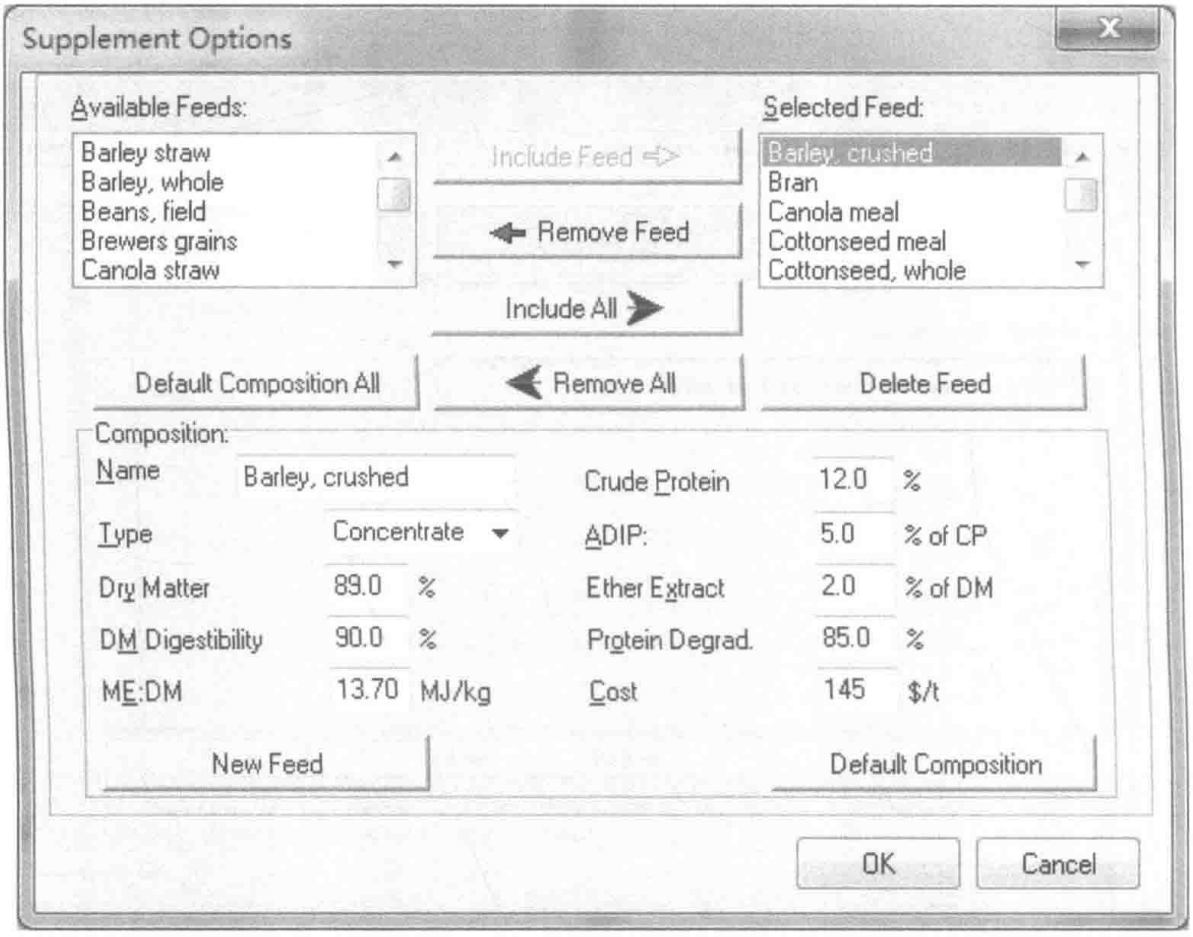
Supp 界面：主要用于描述放牧条件或补饲条件。用户有三种选择：不补饲，补饲精饲料或补饲粗饲料。若用户不打算测验补饲作用时，可以选择第一个选项。若用户需要测验补饲作用时，则选择补饲类型，而补饲又分为两种情况：若用户补的典型饲料同其他饲料混合，有数量限制并假定没有剩余的话，应选择“精料”，其中典型饲料包括谷类、豆类作物，油料饼和颗粒饲料，也可包括一定数量的干草或其他粗料。如果提供粗料冗余采食的话，不要选择“精料”。若用户只补饲了粗料，应选择“粗料”

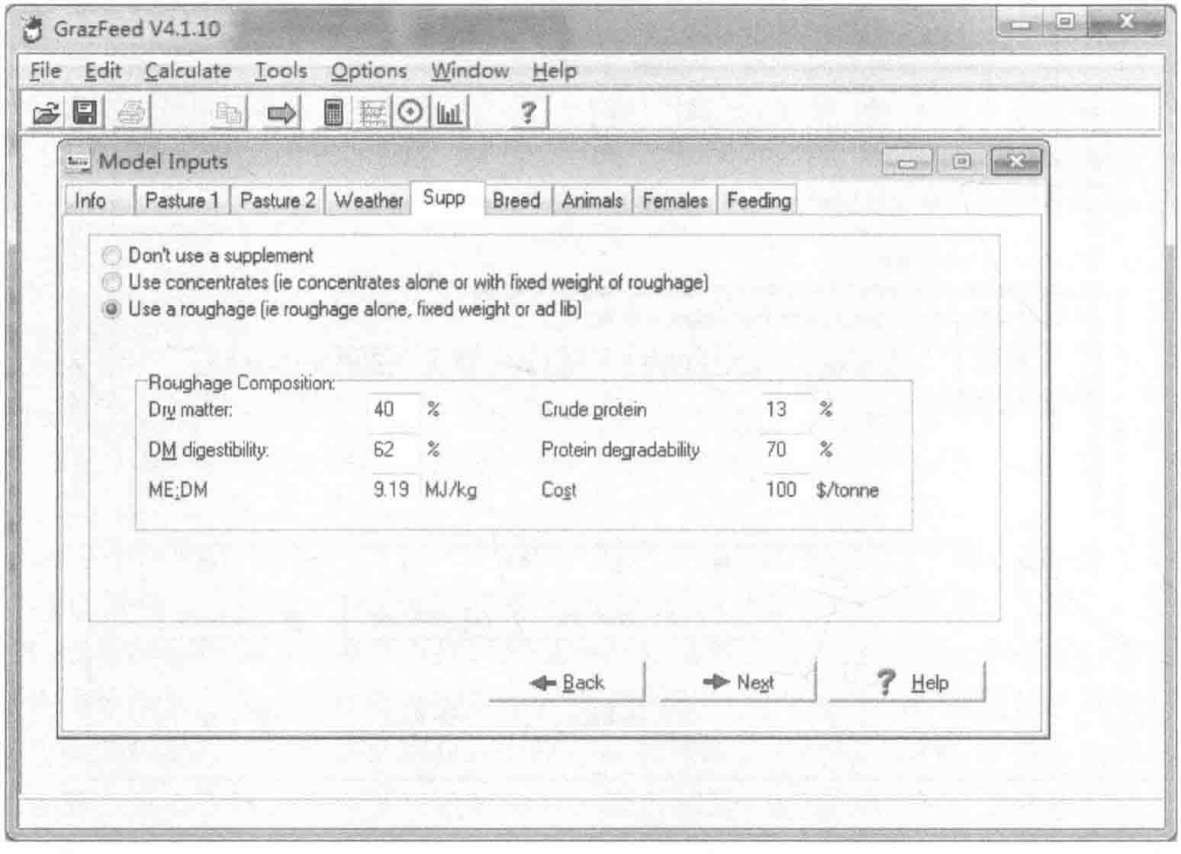
项，如干草、稻草、青贮饲料，程序也提供了限定采食或“冗余采食”（Ad Libitum）的标准。





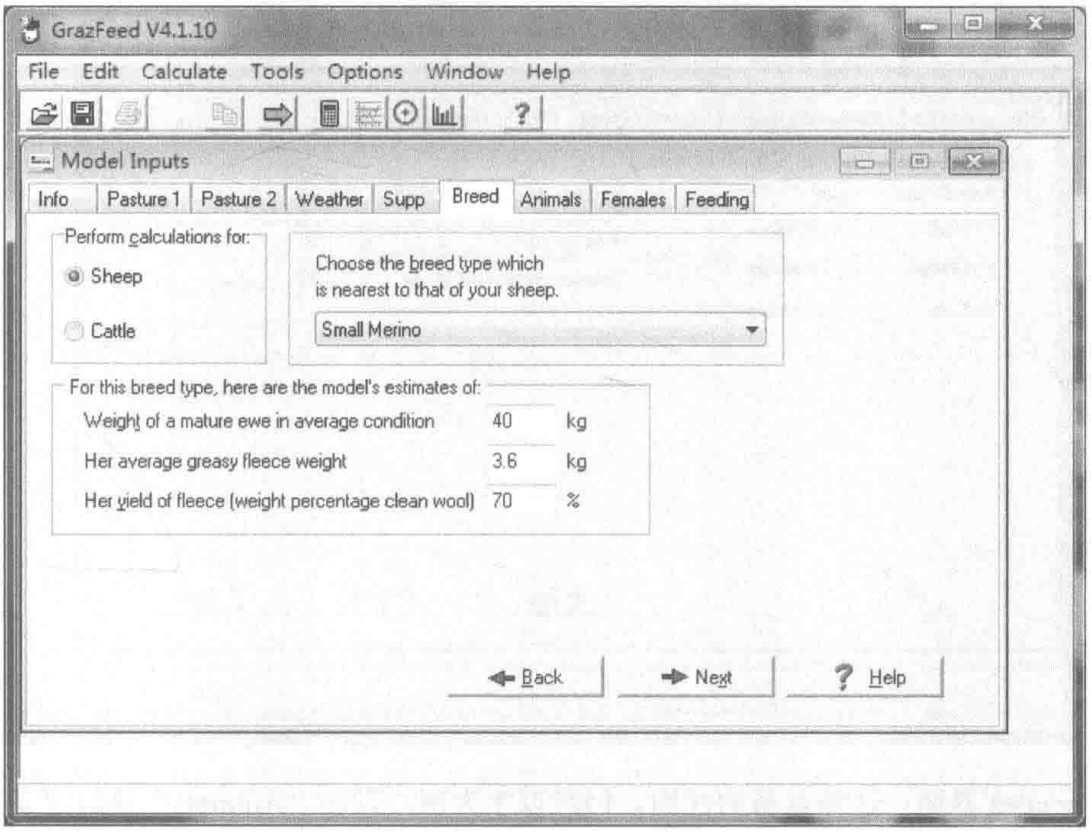
More feeds 界面：为选择更多饲料。

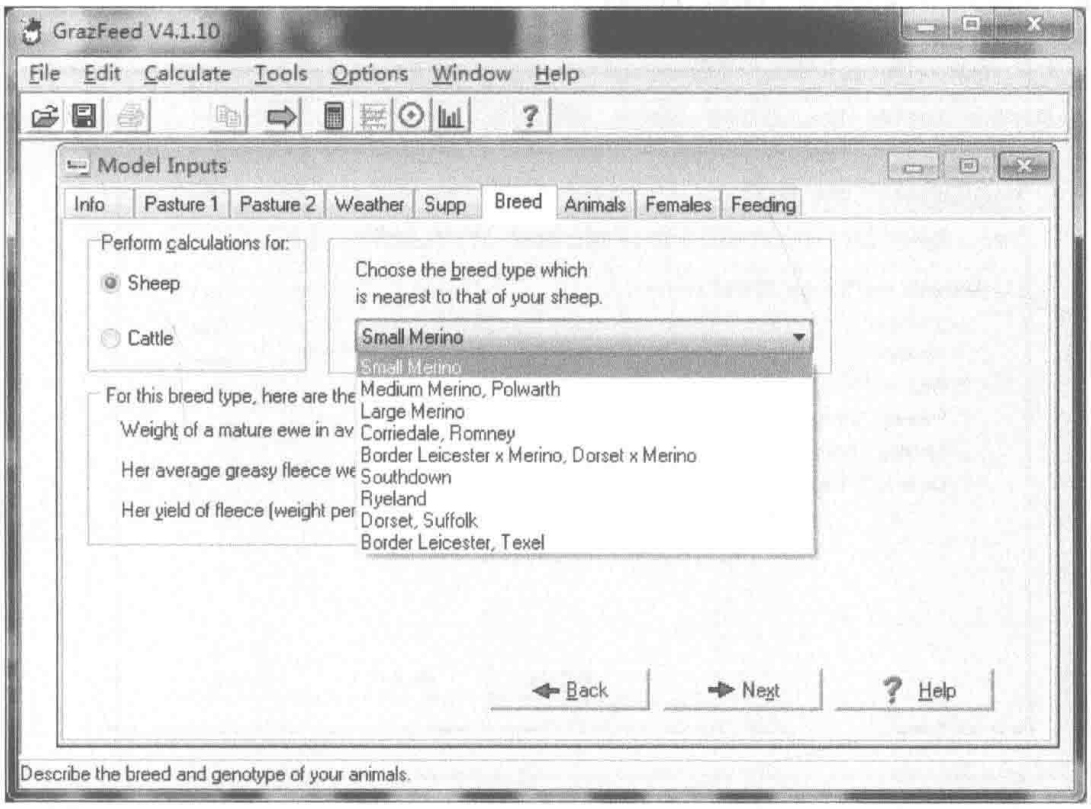




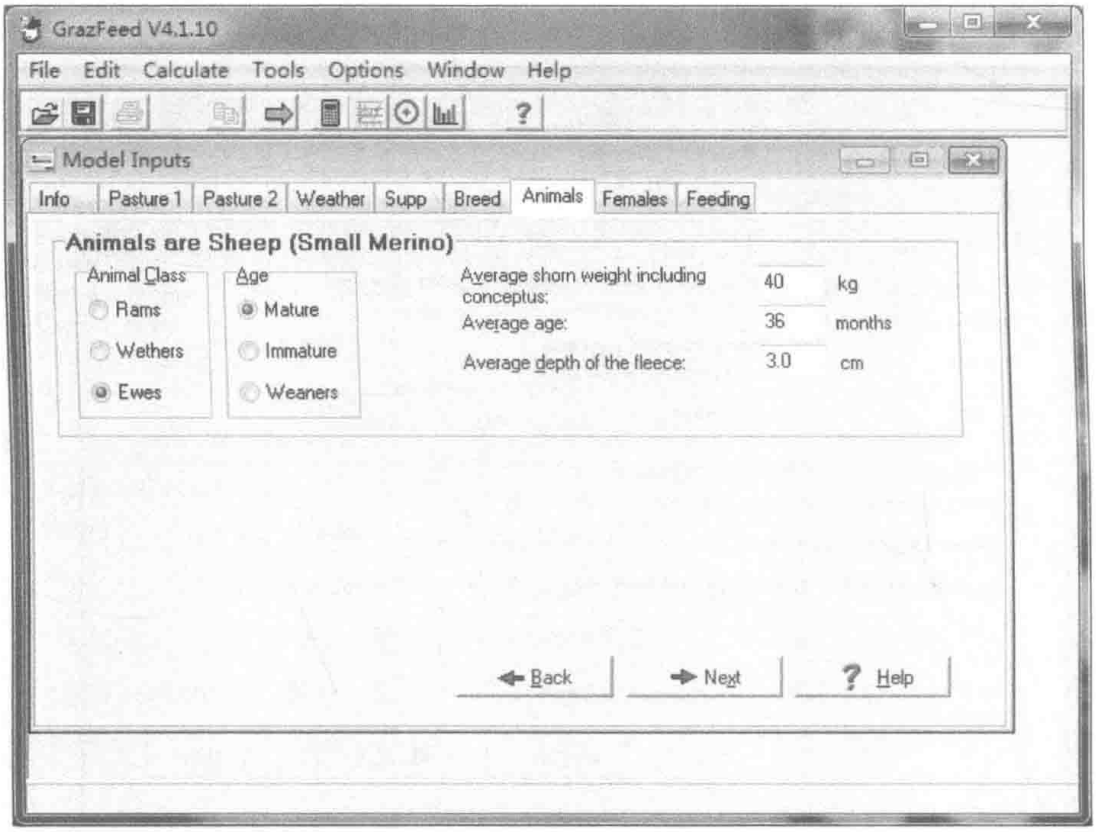
Breed 界面：用于选择家畜品种，选项允许用户在羊和牛之间做出选择，选择家畜

的品种，并描叙品种的特征。

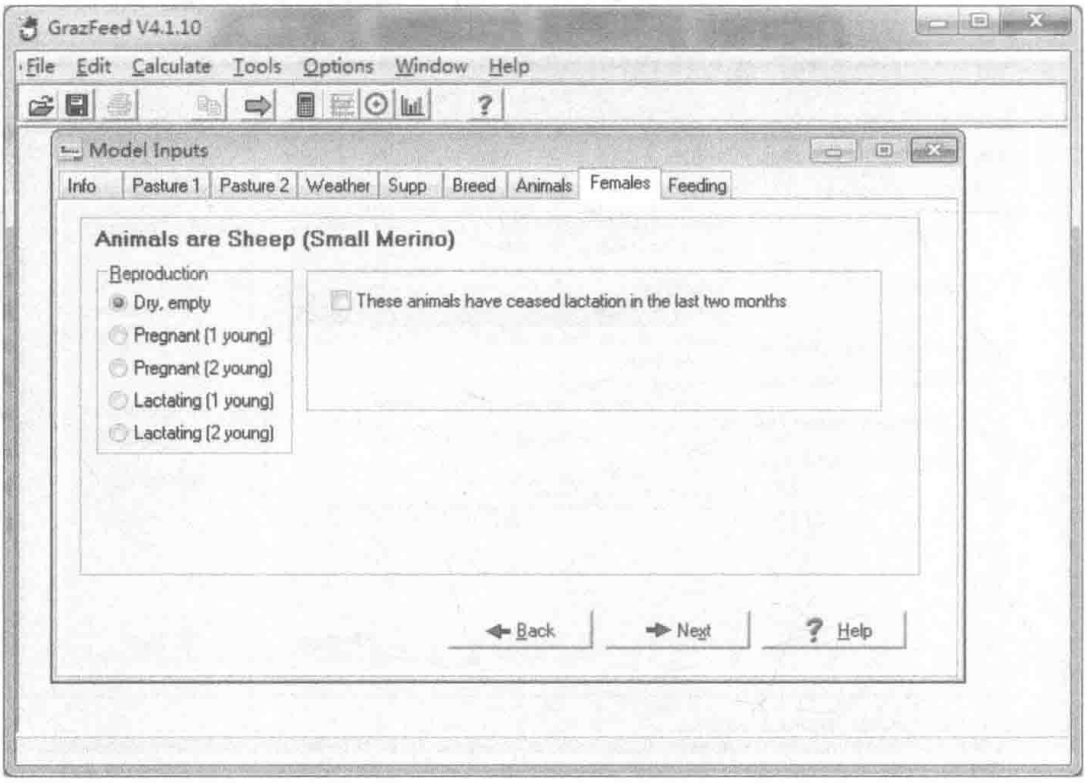




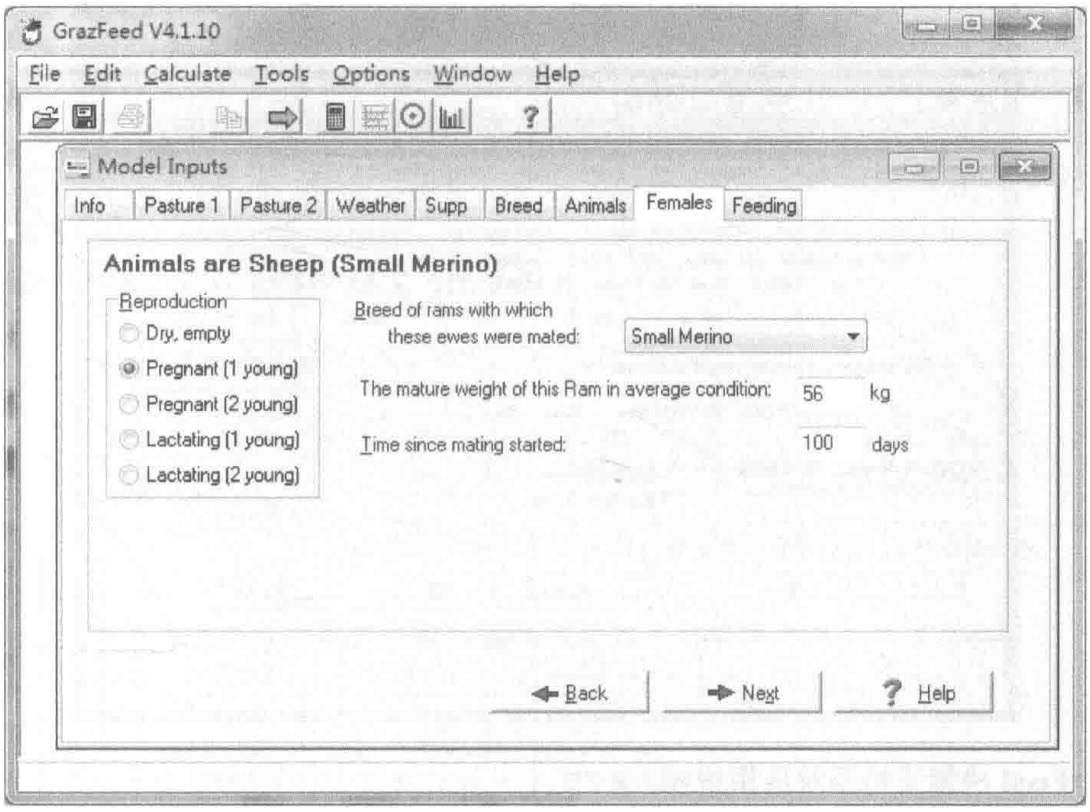
Animals 界面：主要用于描述家畜基础信息，以选择羊为例，需要填写羊的种类（公羊、羯羊、母羊）、年龄（成年、未成年、断奶）、平均剪毛质量（包括孕羊）、平均年龄及平均羊毛长度等。



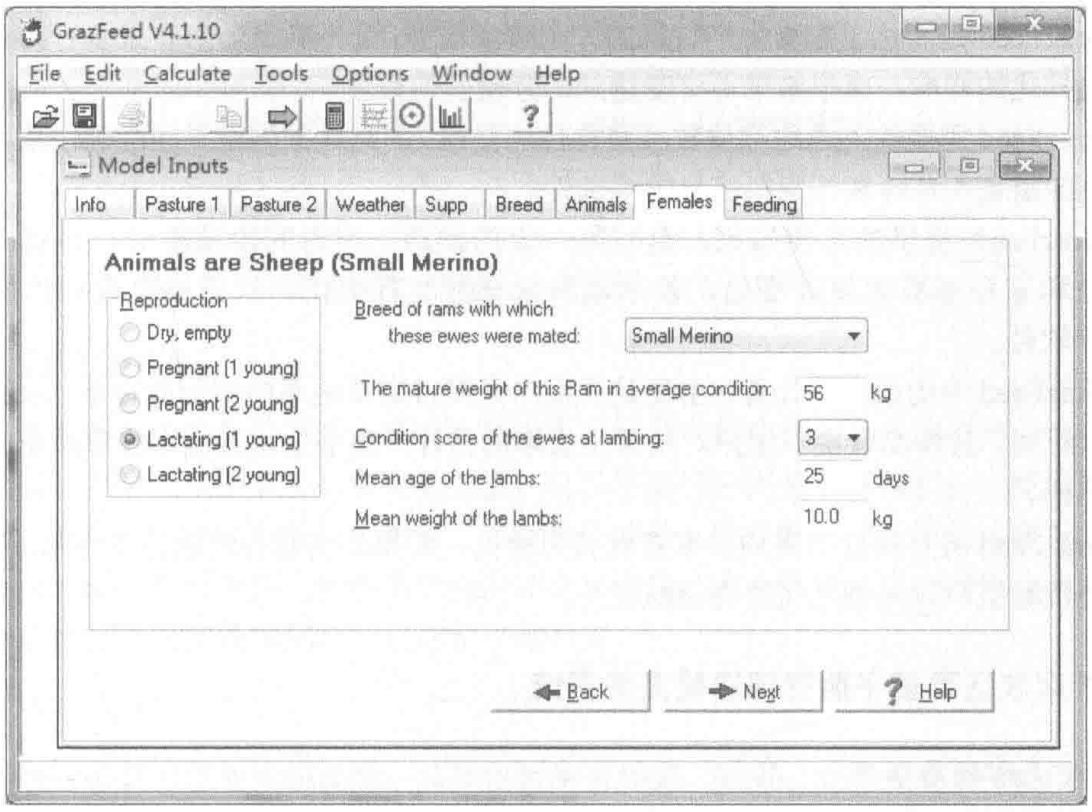
Females 界面：选择家畜的性别，仍然以羊为例，若在“Animals”窗口定义了未成年或成年的母羊，则选择“Dry，empty”。



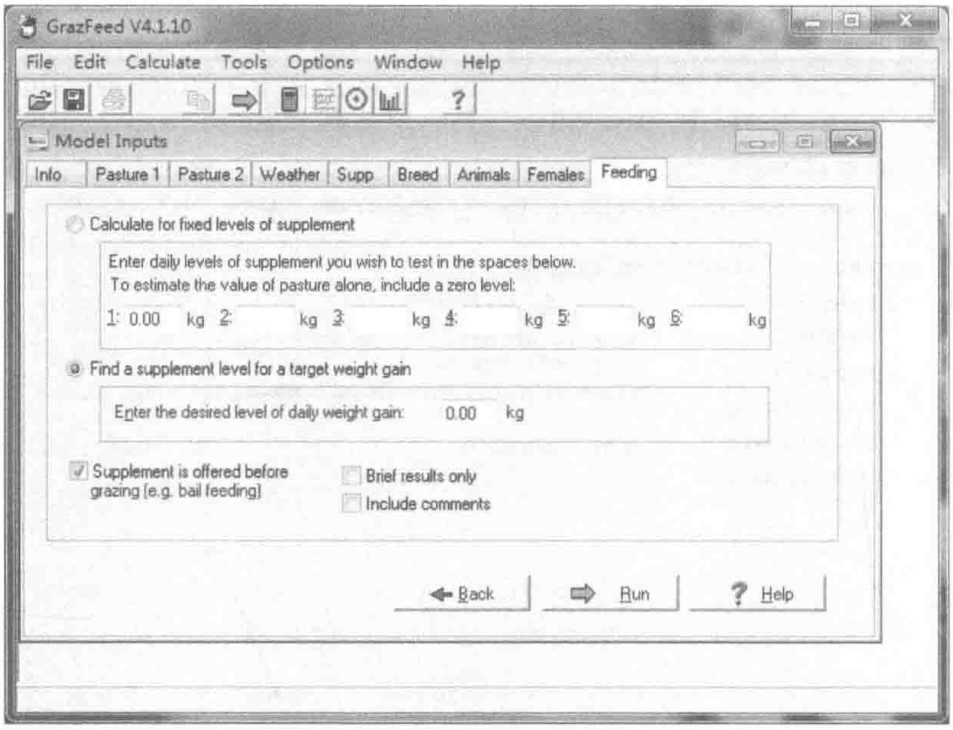
怀孕母羊：从相同的品种菜单里选择羊羔的类型，GrazFeed 能调整胎儿的大小。输入种公羊与母羊放在一起的天数，程序将从这些值中减去 8 天以估计平均妊娠天数。



产奶母羊：生产羊奶需要从同一品种菜单里选择公羊的类型，GrazFeed 可以据此调整羊羔的大小。输入母羊产羔时的体况，软件据此调整母羊的潜在产奶量。



Feeding 界面：主要用于输入饲养信息。用户选择合适的补饲标准或目标产量的标准。当输入合适的值之后，选择喂养方法、输出选择，点击“Run”后将会显示输出。



4. GrazFeed 决策支持系统应用说明

GrazFeed 虽然可以模拟草地放牧家畜的表现，但其以澳大利亚目前反刍家畜饲养标准为标准，虽然理论上 GrazFeed 模型适合任何种类的放牧系统，但应用于不同国家或地区时，需要对相关参数进行校正。

GrazFeed 是简化了家畜生产过程的一个数学模型，受不同反刍家畜采食行为和营养需求差异化的影响，模拟结果不可能达到十分精确的程度。

GrazFeed 需要输入草地和放牧家畜特性的资料，因此其预测结果的准确性依赖于用户提供的家畜、草地和补饲料信息的准确性。

GrazFeed 提供的预测结果，是对某一天的预测。做时间段预测时，其前提假设是草地和家畜基况无显著变化。若草地和家畜基况有变化，就需要更改初始值，重新运行软件。

GrazFeed 中的载畜量计算，主要是让用户预测特定草地下的实际载畜量、放牧强度或放牧时间，其精度取决于用户对牧草生长率的估计，整个生长过程中牧草质量的变化忽略不计。

GrazFeed 所有运行结果均以家畜健康为前提，如果家畜患有严重的寄生虫或疾病，则模型预测值和观测值之间的吻合性较差。

二、甘南牧区草畜平衡管理决策支持系统

（一）系统结构与功能

甘南牧区的草畜平衡状态与草原生态保护、牧民增收问题息息相关，草原生态保护与牧民的收益相互制约、相互影响。若一味强调草原生态保护，可能无法使牧民收益有显著增长；而若不断扩大牲畜数量，虽然可能在短期内能够提高牧民收益，但可能导致

超载过牧、天然草地退化等严重生态环境问题，影响牧区的可持续发展。为了研究甘南牧区草畜平衡状态，合理规划草地生产力、经济收益、生态环境影响力之间的关系，梁天刚等（2011）在构建了甘南州天然草地适宜载畜量监测模型和草畜平衡监测模型的基础上，通过建立多目标优化模型的方法，以实现草畜平衡。甘南牧区草畜平衡管理决策系统主要包括用户管理、草地监测、草地评价、家畜动态、草畜平衡诊断、草畜平衡决策、数据共享和后台维护 8 个模块（图 9-7）。

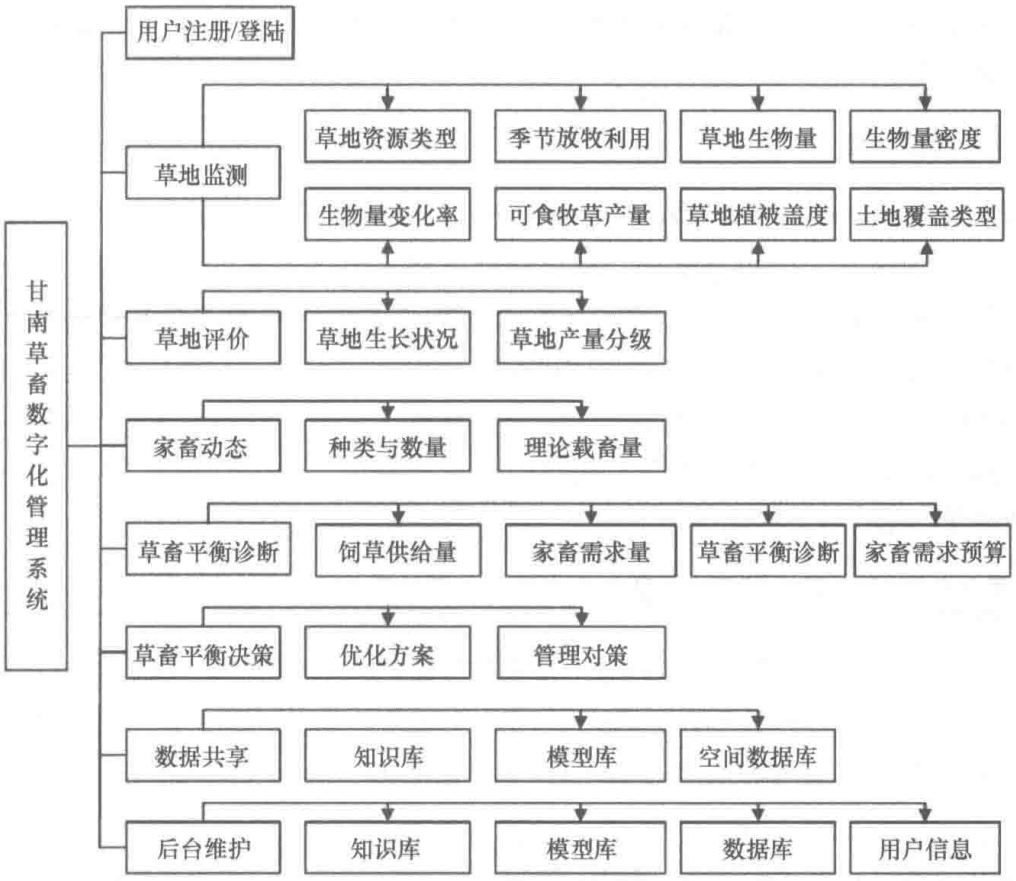


图 9-7　甘南牧区草畜平衡管理决策系统（引自冯琦胜等，2009）

1. 草地监测与评价

以各种遥感影像为数据源，通过植被指数和地面实测资料建立反演模型，动态监测草地分布、产草量和牧草生长状况等信息，可以帮助用户浏览、查询和检索草地资源类型、季节放牧利用分区、草地生物量、可食牧草产量、草地植被盖度和土地覆盖类型等信息。通过遥感监测资料，能够及时动态评价草地生产力。草地生产力评价分为两个方面：一是评价草地生长状况；二是评价草地产量。

2. 家畜动态监测

实现对家畜动态变化的监测，具体包括家畜种类、数量、理论载畜量等内容。

3. 草畜平衡诊断

实现草畜平衡状况的分析与诊断。在分析区域内饲草供给量、家畜需求量的基础上，

为用户提供饲草供求预算结果及草畜平衡诊断信息。

4. 草畜平衡决策

综合考虑生态、经济和社会效益，为用户提供草地畜牧业生产的优化方案和管理决策。

（二）系统关键模型及参数

包括草地监测模型、理论载畜量和适宜载畜量模型、草畜平衡诊断模型、决策目标函数和约束条件。

（三）系统优化方案

利用 MATLAB 软件的多目标规划分析方法，以甘南牧区 2008 年及以前的草地畜牧业和社会经济发展统计数据为基础，研究规划末期（2011 年）甘南牧区社会经济可持续发展的优化方案及管理对策，对比分析优化方案 1（规划末期的总羊单位数小于 2008 年末数值）和优化方案 2（保持 2001～2008 年平均发展水平，并且规划末期的总羊单位数大于 2008 年末数值）的畜群结构、牲畜总增率、净增率、商品率、出栏率、农牧民纯收益、林地、草地及耕地资源等关键指标的数量特征，分析甘南牧区草畜平衡优化方案及管理决策（表 9-1）。

表 9-1 甘南牧区 2 种草畜平衡优化方案的主要约束条件（引自梁天刚等，2011）

优化方案	主要特征	主要约束条件						
		总增率/%	净增率/%	出栏率/%	商品率/%	纯收益/元	林草覆盖率/%	外购精饲料/kg
方案 1	减少牲畜	＞20	＞－10	＞30	＞25	达到 2008 年的 1.3 亿元以上	保持 2008 年水平	未约束
方案 2	增加牲畜	＞26.9	＞－1.4	＞32.0	＞26.5	不约束	保持 2008 年水平	未约束

注：在 2 种优化方案中，各类牲畜死亡及减少率均保持 2001～2008 年的最小值，自食率为 2001～2008 年的最大值，购入牲畜数量均保持 2001～2008 年的平均水平

多目标优化分析的结果表明，在减畜优化方案中，甘南绵羊、山羊、牛、马和骡的优化比例分别为 68.5%、6.4%、25.0%、0.1%和 0.1%。同 2008 年相比，规划末期的绵羊数量增加，山羊、牛、马和骡的数量减少（表 9-2，表 9-3），并且其数量结构在规划期 2009～2011 年需要进行较大的调整，其中绵羊比例应提高 11.8 个百分点，山羊、牛、马和骡子则分别减少 1.6、8.6、1.1 和 0.4 个百分点。在增畜优化方案中，甘南绵羊、山羊、牛、马和骡的优化比例分别为 75.4%、8.8%、14.8%、0.7%和 0.3%。同 2008 年相比，规划末期的绵羊和山羊数量有较大幅度的增加，马的数量有所增加，骡子的数量略有减少，牛的数量则有较大幅度的减少（表 9-2，表 9-3）。对比分析这 2 种优化方案可以看出，在甘南牧区维持草畜平衡和保护草原生态环境的条件下，应大力提高绵羊的数量，适度控制对生态环境影响较大的山羊的存栏数，较大幅度地减少牛的数量，不断减少传统上以役畜为饲养目的的马和骡子的数量。

表 9-2　绵、山羊主要畜群结构指标优化结果（引自梁天刚等，2011）

家畜种类	主要指标	优化方案 1	变化率/%	优化方案 2	变化率/%
绵羊	年初存栏/只	2 275 601	7.66	3 230 025	52.82
	适龄母畜/只	1 080 091	6.81	1 637 267	61.90
	商品畜/只	798 832	32.24	258 745	–57.17
	自食畜/只	91 038	81.21	105 470	109.94
	其他死亡和减少/只	133 320	–12.79	109 500	–28.37
	年内产仔/只	887 360	14.66	1 428 041	84.53
	购入/只	28 200	–50.62	28 200	–50.62
	年末存栏/只	2 167 971	1.43	4 212 551	97.09
	产仔死亡/只	76 104	14.66	122 476	84.53
	商品率/%	35.10	22.82	8.01	–71.97
	自食率/%	4.00	68.31	3.27	37.38
	出栏率/%	39.10	26.32	11.28	–63.58
	产仔率/%	82.16	7.36	87.22	13.97
	净增率/%	–4.73	–520.28	30.42	2 602.99
	总增率/%	33.14	12.78	40.82	38.94
山羊	年初存栏/只	251 022	–21.91	456 303	41.95
	适龄母畜/只	130 120	–13.86	236 529	56.59
	商品畜/只	141 709	27.68	111 355	0.33
	自食畜/只	12 220	–49.20	22 213	–7.66
	其他死亡和减少/只	17 164	–13.49	17 164	–13.49
	年内产仔/只	98 523	–13.86	179 093	56.59
	购入/只	22 501	9.57	7 500	–63.48
	年末存栏/只	200 953	–33.34	492 164	63.25
	产仔死亡/只	8 215	0.00	13 378	62.85
	商品率/%	56.45	63.50	24	–29.32
	自食率/%	4.87	–34.95	4.87	–34.95
	出栏率/%	61.32	45.97	29.27	–30.32
	产仔率/%	75.72	0.00	75.72	0.00
	净增率/%	–19.95	220.93	7.86	–226.45
	总增率/%	32.41	10.22	35.49	20.68

注：变化率=100×（规划末期值－2008 年值）/2008 年值

表 9-3　大牲畜主要畜群结构指标优化结果（梁天刚等，2011）

家畜种类	主要指标	优化方案 1	变化率/%	优化方案 2	变化率/%
牛	年初存栏/头	930 138	–25.70	1 765 549	41.04
	适龄母畜/头	429 352	–23.74	814 977	44.76
	商品畜/头	354 599	43.15	1 368 642	452.51
	自食畜/头	20 268	–12.95	35 996	54.60
	其他死亡和减少/头	79 765	–3.99	50 446	–39.28
	年内产仔/头	263 742	–18.14	504 650	56.64

续表

家畜种类	主要指标	优化方案 1	变化率/%	优化方案 2	变化率/%
牛	购入/头	51 422	15.64	10 900	–75.49
	年末存栏/头	790 670	–37.47	826 015	–34.67
	产仔死亡/头	27 689	–19.58	44 492	29.22
	商品率/%	38.12	92.66	77.52	291.75
	自食率/%	2.18	17.15	2.04	9.61
	出栏率/%	40.30	86.17	79.56	267.51
	产仔率/%	61.43	7.35	61.92	8.21
	净增率/%	–14.99	–1594.22	–53.21	–5 402.99
	总增率/%	19.78	3.56	25.73	34.70
马	年初存栏/匹	36 818	–17.43	41 819	–6.22
	适龄母畜/匹	10 952	–11.46	13 083	5.76
	商品畜/匹	27 387	511.86	4 476	0.00
	其他死亡和减少/匹	1 612	–0.86	1 612	–0.86
	年内产仔/匹	4 170	–0.95	5 557	31.99
	购入/匹	300	–76.65	300	–76.65
	年末存栏/匹	4 398	–90.00	41 587	–5.45
	产仔死亡/匹	308	12.34	535	95.12
	商品率/%	74.38	641.04	10.70	6.63
	出栏率/%	74.38	641.04	10.70	6.63
	产仔率/%	38.08	11.88	42.47	24.80
	净增率/%	–88.05	6368.76	–0.55	–59.37
	总增率/%	–14.49	–349.99	9.43	62.78
骡子	年初存栏/匹	18 000	–17.31	18 000	–17.31
	商品畜/匹	11 004	339.83	2 502	0.00
	其他死亡和减少/匹	99	–92.69	99	–92.69
	购入/匹	1 143	–60.73	1 143	–60.74
	年末存栏/匹	2082	–90.00	16 542	–20.56
	商品率/%	61.14	431.87	13.90	20.93
	出栏率/%	61.14	431.87	13.90	20.93
	净增率/%	–88.43	1 936.96	–8.10	86.57
	总增率/%	–33.65	440.92	–0.55	–91.16

注：变化率=100×（规划末期值–2008 年值）/ 2008 年值

对甘南州 2001～2008 年草地畜牧业生产状况的研究表明，在全年放牧且不考虑补饲条件下，甘南州天然草地适宜载畜量下限为 295.5 万标准羊单位，上限为 502.9 万标准羊单位（表 9-4）。以 2008 年为例，甘南州人工草地和三荒地种草面积 19 760hm^2，生产鲜草合计 5038.8 万 kg，折合 34 512.3 标准羊单位，种植业可提供补饲的精、粗饲料的载畜量为 180 303.1 标准羊单位，2008 年末实际饲养的牲畜为 9 068 593 标准羊单位，按照天然草地适宜载畜量上限且考虑补饲状况时，2008 年甘南州超载率达 72.9%，实际

多饲养牲畜 3 825 020 标准羊单位。若按照精饲料折算，所需补饲量达 1 396 132 361kg，而甘南全州 2008 年农牧民纯收益仅为 1.3 亿元。

表 9-4　甘南州天然草地适宜载畜量标准（引自梁天刚等，2011）

行政分区	可食牧草产量下限/（10^4kg 干重）	适宜载畜力下限/（标准羊单位/hm^2）	适宜载畜量下限/（10^4 标准羊单位）	可食牧草产量上限/（10^4kg 干重）	适宜载畜力上限/（标准羊单位/hm^2）	适宜载畜量上限/（10^4 标准羊单位）
甘南州	194 167.4	1.1	295.5	330 389.4	1.9	502.9
合作市	12 281.1	1.1	18.7	20 977.0	1.8	31.9
临潭县	3 718.7	1.1	5.7	6 265.0	1.8	9.5
卓尼县	22 940.4	1.0	34.9	38 984.0	1.8	59.3
舟曲县	3 929.3	1.0	6.0	5 988.2	1.6	9.1
迭部县	9 097.7	1.0	13.8	14 837.4	1.6	22.6
玛曲县	72 494.3	1.2	110.3	124 035.1	2.1	188.8
碌曲县	32 249.9	1.2	49.1	54 749.2	2.0	83.3
夏河县	37 456.1	1.1	57.0	64 553.5	1.8	98.3

注：表中所有指标的上限值和下限值分别表示在不考虑补饲及全年放牧条件下甘南各县（市）相关指标的多年（2001～2008 年）平均值和最大值

总体而言，甘南牧区草畜平衡决策管理系统通过对草地畜牧业的快速监测、评价和高效管理，以维持草畜平衡、优化畜群结构和保护草地生态环境为总目标，综合分析畜群结构、牲畜总增率、净增率、商品率、出栏率、农牧民纯收益等数量变化特征，可以对甘南牧区草畜平衡优化提供多种方案和相应的管理决策。其中，减畜优化方案是实现上述目标的根本途径。具体措施包括：①适度调整牲畜数量，改良品种，优化畜群结构；②调整农作物播种面积及结构，增加人工草地种植面积，提高补饲水平；③稳定天然林草面积，维护牧区生态环境；④增强畜牧业生产效益，提高出栏率；⑤严格控制人口数量，加强国家政策调控机制。

思　考　题

1. 简述决策支持系统的内涵和结构?
2. 决策支持系统的种类包括哪些?
3. 简述草业决策支持系统建设的原则?
4. 简述草业决策支持系统的目标和内容?

参 考 文 献

曹卫星, 罗卫红. 2000. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京: 华文出版社.

陈德军, 盛翊智, 陈绵云. 2003. 一般决策支持系统架构体系研究[J]. 武汉理工大学学报, 25(7): 60-63.

陈文伟. 2000. 决策支持系统及其开发(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社.

冯琦胜, 王玮, 梁天刚. 2009. 甘南牧区草畜数字化管理系统的设计与开发[J].中国农业科技导报, 11(6):

93-101.
冯珊. 1993. 将智能决策支持系统设计成人—机联合认知系统[J]. 系统工程理论与实践, 13(5): 1-5.
高洪深. 2009. 决策支持系统(DSS)理论与方法. 第 4 版[M]. 北京: 清华大学出版社.
郭银巧, 郭新宇, 李存东, 等. 2006. 基于知识模型的玉米栽培管理决策支持系统[J]. 农业工程学报, 22(10): 163-166.
李刚. 2006. 内蒙古草地生产力和锡林浩特市草畜空间管理模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所硕士学位论文.
梁天刚, 冯琦胜, 夏文韬, 等. 2011. 甘南牧区草畜平衡优化方案与管理决策[J]. 生态学报, 31(4): 1111-1123.
刘博元, 范文慧, 肖田元. 2011. 决策支持系统研究现状分析[J]. 系统仿真学报, (B07): 241-244.
倪金生, 李道亮, 姜航. 2007. 农林信息技术[M]. 北京: 电子工业出版社.
牛贞福. 2004. 基于知识规则的黄瓜栽培管理多媒体专家系统的研发[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文.
史明昌, 王维瑞. 2011. 数字农业技术平台技术原理与实践[M]. 北京: 科学出版社.
汤亮, 曹卫星, 朱艳. 2006. 基于生长模型的油菜管理决策支持系统[J]. 农业工程学报, 22(11): 160-164.
王辉鹏, 董春游. 2009. 决策支持系统发展研究[J]. 应用能源技术, (6): 48-50.
魏玉蓉, 潘学标, 敖其尔, 等. 2007. 草地牧草物候发育模型的应用研究——以锡林郭勒草原为例[J]. 中国生态农业学报, 15(1): 117-121.
杨锦忠, 董宽虎. 1999. 草地决策支持系统的开发与实践[J]. 草原与草坪, (3): 7-11.
朱艳, 曹卫星, 王其猛, 等. 2004. 基于知识模型和生长模型的小麦管理决策支持系统[J]. 中国农业科学, 37(6): 814-820.
Feiwel M. 1968. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool1[J]. Nurs Times, (23): 759-762.
Spague RH. 1980. A framework for the development of decision support systems[J]. MIS Quarterly, 4(4): 1-26.

第十章　草业专家系统

专家系统（Expert System，ES）是人工智能从理论研究走向实际应用，从一般思维方法探讨转入专门知识运用的典范。近年来，草业信息学的加速发展和草业信息技术的普及，推动了草业专家系统的研制与开发。本章主要介绍草业专家系统（Pratacultural Expert System，PES）的概念、特征、基本结构与功能，以及知识表达、知识获取和系统开发方法。

第一节　草业专家系统的概念、特征与结构

草业专家系统是基于草业专门知识和经验的人工智能系统。本节从概念、特征和结构等方面对草业专家系统的基本知识进行介绍。

一、草业专家系统的概念

专家系统是一种具有大量专门知识与经验的智能计算机程序系统（敖志刚，2010）。它把专门领域中人类专家的知识和思考解决问题的方法、经验和诀窍进行组织整理并存储在计算机中，不但能模拟专家的思维过程，而且能宛如人类专家那样智能化地解决实际问题（王智明等，2006）。

从这个概念出发，结合草业生产和科研的实际，草业专家系统可以定义为一个以大量的权威草业专家的经验与成果及专业资料和数据构成的知识库为基础，并能利用这些知识，模拟草业专家的思维过程，分析解决草业生产领域相关问题的智能计算机程序系统。

二、草业专家系统的特征

（一）拥有专家水平的专门知识和能力

草业专家系统将一个或多个专家的知识、经验及解决问题的思路和方法，以数据库、知识库、模型库的形式进行储存和问题处理。例如，“苜蓿病害诊断专家系统”（王淑英等，2001）不但能以专家的水平在苜蓿生产和科研的病害诊断及防治领域高效、准确、迅速地进行工作，而且不会像人类专家那样产生疲劳、遗忘，还不受环境、情绪等因素的影响。

（二）突破了空间和时间的限制

由于构成专家系统的软件程序能够永久保存，并可复制，可在互联网上进行传递，

因而与人类专家相比，草业专家系统更易于大范围使用和传播。

（三）能够有效地进行推理求解

与固定程序控制下的指令执行过程不同，草业专家系统的工作是在环境模式驱动下依靠知识表达技术和知识推理技术，进行知识的收集、编码、存储、编排等符号化处理，并模拟草业专家的思维过程，对专门问题进行精确性推理求解和非精确性推理求解。

（四）具备咨询解释能力

作为基于知识的智能问题求解系统，与一般计算机程序相比，草业专家系统不仅能够对用户的提问给出解答，而且还能以可理解的方式解释获得结论的推理过程，提供可信度估计，以便让用户明确答案的求解过程，提高对草业专家系统的信赖。

（五）可以自主获取知识

草业专家系统能够进行自学习，不断总结规律，增长知识，更新知识，扩充和完善系统自身。这一点是传统计算机程序无法比拟的。

（六）具有友好的智能人机界面

草业专家系统一般采用多媒体技术和可视化技术，实现语音、文字、图形和图像的直接输入输出，界面友好，操作简单。

草业专家系统是一种能进行多功能集成的专家推理系统，且具有实用性较强的特性，使其应用领域涵盖前植物生产层到植物生产层、动物生产层和后生物生产层，涉及草业生产的产前、产中和产后的全过程。随着草业科学与信息学的不断发展和深度融合，草业专家系统解决实际问题的能力会越来越强，在草地畜牧业生产和管理中所起的作用也会越来越大。

三、草业专家系统的结构

草业专家系统的结构是指草业专家系统各组成部分的构造方法和组织形式。从自身的适用性和有效性出发，为使系统具有扩展的可能性，草业专家系统一般采用模块化结构（梁天刚等，2002），通常由 7 个模块构成（图 10-1），它们分别是用户接口模块、推理机模块、知识库模块、学习器模块、结论输出模块、知识获取模块和解释机构模块。

这 7 个模块按图 10-1 所示的形式进行组织，各个模块的主要功能概述如下。

（一）用户接口模块

一方面它使用接近于自然语言的计算机语言，把用户的要求和所提供的事实以数据、文字、图形、图像等方式传给草业专家系统，使用户能够方便地操纵系统运行；另一方面它把系统处理的结果和知识库的解释以一定方式交给用户，并将信息转换为易于理解的形式。

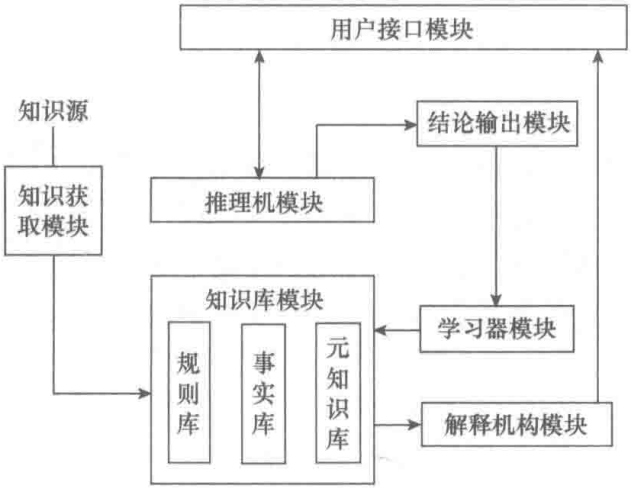


图 10-1　草业专家系统结构

（二）推理机模块

它是一组用来控制和协调整个草业专家系统的程序，是草业专家系统的核心。它根据知识库中的知识，按照一定的推理策略，对用户输入的事实和数据进行解释，继而求解当前问题，推导出结论，并向用户提示。在一些大中型专家系统中，推理机模块由知识库管理系统和推理机两个部分组成。其中，知识库系统实现对知识库中知识的合理组织和管理，并能够根据推理过程的需求去搜索、运用知识，以及对知识库中的知识做出正确的解释；而推理机主要用于进行推理，并控制推理的进程和使用知识库中的知识。

（三）知识库模块

知识库是草业专家系统的知识和数据存储器，存放着通过推理、学习和知识获取得到的权威性知识与数据，包括事实数据库、规则库和元知识库。一般来说，前两者存储草业专家的经验知识和相关领域专门知识，后者存储元知识，即相关知识的来源和解释知识的其他相关信息。

（四）学习器模块

它通过学习对知识库的内容进行扩充、修改，使草业专家系统具有自动增长知识的能力。

（五）结论输出模块

它将推理结果以便于用户理解的形式进行输出。

（六）知识获取模块

它利用手工、半自动、全自动的方式获取外部环境的知识。一方面，由知识工程师通过领域专家获取知识，并利用相应的知识编辑软件把知识保存到知识库中；另一方面，将知识工程师的知识进行转换、加工为计算机可识别的内部表示。有的草业专家系统自身就具有部分学习功能，由系统直接与领域专家对话获取知识；有的系统可在系统运行过程中通过归纳、总结，得出新知识；有的系统通过传感器自动获取外部

知识和数据。

（七）解释机构模块

它以用户便于接受的方式解释草业专家系统推理结论的正确性和推导过程，包括系统提示、人机对话、能书写规则的语言及解释部分程序。目前，大多数草业专家系统的解释机构都采用人机对话的交互式解释方法。在基于规则的草业专家系统中，系统的解释通常是与某种规则的追踪形式相联系的，当系统进行解释时，那些被追踪的规则将被触发。

第二节　草业专家系统的开发过程和知识获取

草业专家系统的开发是一项从选题开始，包含系统分析、设计、编程、调试等一系列人机交互过程的系统工程。知识获取则是建立草业专家系统最基本的过程。本节首先简要说明草业专家系统的开发过程，然后对知识获取的相关概念和知识库的建立进行介绍。

一、草业专家系统的开发过程

一般来说，草业专家系统的开发过程从选题与明确任务开始，在分析系统需求之后，收集、归纳、整理权威草业专家和相关文献资料的知识，进行概念化处理，再以形式化的表示方式存储到计算机中；然后根据所获取的知识，确定系统的实施策略、推理方式和对话模式模型等，完成系统设计，进入编程与调试阶段，由草业专家系统开发人员将形式化的知识转换为计算机程序，并反复进行编译、验证、修改等调试；编制完成并经过调试的程序，称为草业专家系统原型软件，它必须要通过运行大量的实例来测试其性能，以确定系统的实现方案是否合适；测试结果达到需求的系统，就可以交付使用，在使用过程中还需不断进行系统的维护和完善（图 10-2）。

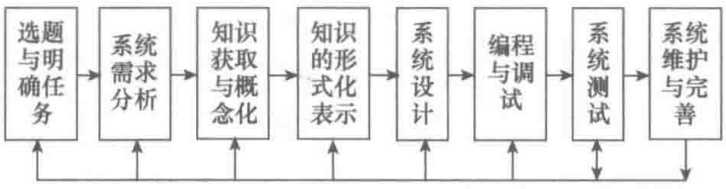


图 10-2　草业专家系统开发过程

二、草业专家系统的知识获取

决定草业专家系统性能的关键因素是它所具备知识的质量与数量。在解决了知识表示的基础上，如何获取人类专家拥有的知识或相关资料保存的知识并被计算机快速、便捷、准确地应用，是草业专家系统必须解决的一个关键问题。有效获取专家头脑中的领域知识和人类长期积累的文字知识是建立草业专家系统最基本也是最重要的过程。

（一）知识获取的概念和功能

所谓知识获取就是将从人类专家处和其他知识源中获取的事实、关系、试验资料等领域知识，经识别、理解、筛选、归纳等步骤，进行概念化处理和形式化表达，以知识库的形式在计算机中存储、传输及转移。

在整个草业专家系统建设过程中，知识获取环节主要负责收集、整理、筛选、归纳有用的知识，因而它具有对知识源的有效收集、整理精炼和智能学习 3 个功能。也就是说，它不仅能对人类专家的专业技能和业已取得的科研成果进行有效的收集，并通过整理和精炼去除冗余、修正错误，还能够对所获取的知识进行智能学习。

（二）知识获取的基本过程

草业专家系统的可信赖程度是由为系统提供专门知识的领域专家的水平来决定的，这里的“领域专家”是一种泛指，它代表一个专家群体，好的领域专家应该具有丰富的专业知识、实践经验和理论技术，能够很好地分析和解决领域内的实际问题。

整个知识获取过程一般要经历以下几个阶段：①知识源的确定阶段，确定知识源的内容、形式和提供对象；②知识的概念化表达阶段，对问题求解所需知识的关系、策略、控制机制等进行定义和说明；③知识的形式化表示阶段，将概念化知识模型转变为便于在计算机中检索和管理的形式化知识模型；④知识库建立阶段，将形式化知识模型通过在计算机存储器中进行存储、组织、管理，形成有机的知识集群；⑤知识库的测试、精炼和维护阶段。在实际操作中，以上几个阶段往往会相互交织、重叠，还可能反复进行。

（三）知识获取的方式

根据知识获取的自动化程度，可将其分为非自动知识获取和自动知识获取两类基本方式。

1. 非自动知识获取

进行非自动知识获取，首先由知识工程师与草业专家进行交流，阅读相关文献，获取专家系统所需的原始知识；其次对获得的知识进行条款化表达，并交草业专家审查；最后把反复审查修改确定的知识条款用知识编辑器转换为计算机可识别的内部语言形式。例如，“苜蓿病害诊断专家系统”的各种病害诊断知识库就是通过非自动知识获取方式建立的。

草业专家系统中的知识可能来自多个知识源，如研究报告、报刊、论著、专利、教材、数据库、经验数据及系统自身的运行实践等，其中主要知识源是领域专家。知识工程师的大多数工作是由草业专家系统的设计及建造者担任的，在进行非自动知识获取时，他们的主要任务有以下几部分。

1）熟悉相关专业，与领域专家进行交流，阅读有关文献，获取草业专家系统所需要的原始知识。

2）对获得的原始知识进行分析、归纳、整理，形成用自然语言表达的知识条款，然后交领域专家审查。这很可能是一个反复的过程，通过知识工程师和领域专家的多次

交流，去伪存真，直至把知识条款完全确定下来。

3）把最后确定的知识条款用知识表示语言表示出来，通过知识编辑器进行编辑输入。

知识编辑器是用于知识表示和输入的软件，它是专家系统的问题求解所需知识在计算机中的表示方法、表示形式和组织原则的集成，通常由知识工程师为特定的专家系统专门编制。为了使系统的问题求解简便、正确、高效，知识编辑器应具备以下主要功能：将用知识表示语言所表示的知识转换为计算机可识别的形式，并把这些知识按照一定的方式组成计算机能处理的数据结构和系统控制结构，进而形成知识库；能够对各类知识进行高效的转换，且转换后能够很好地支持以高效的算法完成对问题的推理求解；检测所输入知识的正确性、完整性和一致性，以便对知识进行增加、删除和修改，并保证在修改过程中对已有知识的内容及结构不产生或少产生干扰。

2. 自动知识获取

自动知识获取是指由系统自身直接完成的知识获取活动。这种方式下，系统不仅可以直接与草业专家对话，从专家提供的原始信息中“学习”专家系统所需的知识，而且还能从系统自身的运行实践中总结、归纳新知识，发现原有知识的错误并进行修正，并通过不断的自我完善，建立性能更好、内容更为完备的知识库。常用的自动知识获取方式主要有以下几种。

1）自然语言理解：主要借助于自然语言处理技术，针对文本类型的信息源，通过语法、语义分析，推导文本内容属性，抽取与领域相关的语义实体及其关系，实现知识获取。

2）模式识别：主要针对多媒体信息源（如图片、语音波形、符号等），采用统计方法等对事物或现象进行描述、辨认、分类和解释，从经数字化处理后的数据中识别事物对象的特征。

3）机器学习：机器学习是研究如何使用机器（计算机或智能机）来模拟或实现人类学习活动（获得新知识和新技能），重新组织已有的知识结构，使之不断改善自身性能的科学。对机器学习可以从狭义和广义两个角度去理解。狭义的机器学习是指通过系统设计、程序编制和人机交互，使机器获取知识。例如，在“苜蓿病害诊断专家系统”建立过程中，通过人工移植的方法，将苜蓿病害知识存储到机器中。除了人工知识获取外，广义的机器学习还可以通过自动和半自动的方式获取。例如，在专家系统的调试和运行过程中，通过机器学习进行领域知识的积累，对知识库进行增删、修改、扩充和更新。

4）数据挖掘与知识发现：基于数据挖掘的知识获取是近几年发展起来的新方法，它主要针对结构化的数据库，从大量的、不完全的、有噪声的、模糊的、随机的数据中，提取隐含在其中的、人们事先不知道的、但又潜在有用的信息和知识的过程，是克服数据丰富而知识（或信息）贫乏问题、获取信息的重要手段。

（四）知识的概念化方法

草业专家或科技文献中的知识通常是以文字、图形、表格等形式来表示的，而草业

专家系统知识库中知识的表示方式则与之差别较大，后者必须表示为计算机所能够识别和运用的形式。为了把从草业专家及相关文献中抽取出来的知识存储在知识库中，供求解问题时使用，需要将其转换为产生式规则、框架等形式的知识条款，这就是知识的概念化。

知识的概念化以获得知识条款为最终目的，一般分两步进行：第一步把从专家及文献资料中抽取的知识转换为某种知识表示模式，如在“苜蓿病害诊断专家系统”中，采用依据病害发生部位进行归类的模式，对苜蓿病害的特征知识进行表示；第二步把该模式表示的知识转换为系统可直接利用的内部形式。前一步工作通常由知识工程师完成，后一步工作一般通过输入及编译实现。知识文本是构造知识库的基础，概念化阶段以获得完整的文本而结束。文本的获取方式主要有面谈法和模拟法。

1. 面谈法的知识文本形成

与专家面对面交谈是一种广泛使用的知识获取方式，但是不拘形式的会谈不容易获得详细知识。因此，可以与草业专家就某一专题进行面对面的交谈，即向专家提出预先准备好的问题，由专家给予专业性的回答，然后知识工程师将答案整理成知识条款。这些问题大致以两种形式出现：“在什么情况下如何处理”和“为什么要这样处理”。交谈是获取领域专家使用的概念和术语常见的方法，特别是缺乏书面材料的情况下，通过交谈可以准确把握专业概念和术语的内涵。

2. 模拟法的知识文本生成

模拟法分为静态模拟和动态模拟两种形式。进行静态模拟有两种形式：一种是开始就把所需的条件和数据提供完备；另一种是只提供部分原始数据，待求解过程中根据专家的要求进行补充，从而看出专家使用数据的顺序。在静态模拟过程中，知识工程师向草业专家提出一组实例，给出相关的资料及初始数据；草业专家针对该问题进行求解，并说明求解过程中所用的知识与步骤，得到一套材料；经过知识工程师的总结后形成知识文本。

动态模拟是在草业专家处理某个真实问题时，知识工程师通过观察并记录下其实际求解步骤与相关信息，然后分析处理所记录内容，形成知识文本。这种方法的优点是能够观察到草业专家在自然状态下的工作过程，缺点是较费时费力。

（五）知识库的形式化过程

知识库是陈述性知识和过程性知识的集合，而知识的表示形式是知识库系统首要解决的问题，它应当用计算机可以理解的方式对知识进行表示，同时以一种接近自然语言的方式将处理结果告知用户。也就是说，知识库的知识必须以某种一致化的结构存储和组织，以实现计算机自动知识处理和问题求解，这就是知识的形式化表示。

知识库的形式化过程，将知识文本转换为形式化的新文本，这个过程的步骤为：首先按照预先设计好的专家系统组织形式把知识条款划分为若干块，然后给每一块选择恰当的数据结构，以符合知识库输入要求的格式写出每块的知识，最后根据系统结构对各

个知识块进行组合排列。

以“苜蓿病害诊断专家系统”为例，知识库的形式化首先是按苜蓿病害的发生部位对其进行归类，把知识条款划分为叶部病害、根部病害、茎部病害和全株病害 4 个部分，然后依据各类病害诊断过程中领域特征知识的逻辑关系，采用关系型数据库的组织方式将相关知识录入计算机，从而建立苜蓿病害诊断知识库（王淑英等，2001）。

（六）创建知识库

创建知识库就是将形式化的知识存储于计算机中，并且把各条知识链接起来，形成“知识库规则链表”，这些知识通常是以文件的形式存放的，在专家系统进行推理判断时将被调用。

（七）知识库的调试、精炼与维护

知识库调试主要是用推理机测试所有可能推理路径的可达性，是对获取的知识进行事实、规则和框架的识别、分解、编译，并进行知识的调试，保证知识库的语法正确性、协调性和完整性。

知识库的精炼是指消除知识库中的冗余、知识中的二义性和不可达现象。知识库的调试和精炼二者相辅相成。

当知识库经过调试与精炼并提供给专家系统使用后，要对专家系统进行维护。这些维护包括知识库的显示、知识库中知识增加后的再调试与精炼、知识库中知识删除后的再调试与精炼、知识库中知识修改后的调试与精炼。

第三节　草业专家系统的知识表达

知识表达研究用怎样的数据结构将有关问题的专家知识以符号形式存入计算机中，以便于系统程序进行处理。本节将从概念、结构、表示方法等方面对产生式表示法、面向对象表示法、语义网络表示法、框架表示法、谓词逻辑表示法进行详细介绍。

一、知识表达的要求

恰当的知识表达可以使纷杂的问题变得清晰而有条理，总的说来，知识表达要满足 4 点要求：一是表达能力，即能够将问题求解所需的知识正确有效地表达出来。包括知识表示的广泛性、高效性，对非确定性知识表示的支持程度等。二是可理解性，即对知识的表达形式简单明了，符合一般的思维习惯。所表示的知识易懂、易读、易获取、易维护，使人和计算机易于理解。三是可利用性，即对推理的适应性和对高效算法的支持性。为了有效地进行问题求解，系统程序能够高效和准确地使用与检查知识，还需要有便于利用的知识表示形式。四是可维护性，即在保证知识的一致性与完整性的前提下，对知识所进行的增加、删除、修改、恢复等能力，并保证修改过程中对已有知识的内容及结构不产生或少产生干扰。同时，为了便于系统程序进行统一处理，知识表达的结果则要满足 3 个条件：有统一的结构模式、有一致的符号、上述模式和符号能构成合理的

知识体系。

知识表示水平的高低是决定一个专家系统的性能优劣的主要因素之一。为了将专家在该领域独特的理论知识、见解、经验知识以特定形式进行描述、表达，并输入计算机的知识库，就要遵循以下原则：成熟性原则，在对草业专家系统的领域知识和问题处理思路进行表达时，要尽可能选择能够确切反映与表示这些知识和思路的业已成熟的知识表示方法；综合性原则，草业专家系统所用的知识和思路涉及畜牧学、生态学、植物学、经济学等多个学科，因而较为复杂，这就要采用若干种基本的表达方式综合地来表达；灵活性原则，为了有效地表达草业专家系统的知识和思路，在兼顾成熟性的同时，针对具体的专门知识，要提出并形成一套相应的知识表示策略，不能生搬硬套其他专家系统使用的策略。

知识表达方法就是用各种不同的形式化的知识模型表示知识的方法。目前，知识表达的方法种类繁多，分类标准也不尽相同，常用的方法有产生式表示法、面向对象表示法、语义网络表示法、框架表示法、谓词逻辑表示法等。

二、产生式表示法

产生式表示法用于描述事实、规则及它们的不确定性度量。由于它的可行性较强，因而是构建草业专家系统知识库的主要方法之一。产生式可看成是断言一个语言变量的值或多个语言变量之间关系的陈述句，语言变量的值或语言变量的关系可以是一个词，不一定是数字。

（一）产生式的结构与组成

事实的表示。一般使用三元组（对象，属性，值）或（关系，对象 1，对象 2）来表示事实，其中对象就是语言变量，若考虑不确定性就是四元组表示，即（对象，属性，值，不确定度量值）。例如，对事实“紫花苜蓿是豆科植物”可以表示为（Alfalfa，Species，Leguminous）；而“褐斑病和锈病都是植物病害”则可以表示为（Plant Disease，Brown Spot Disease，Rust Disease）。

规则的表示。在自然界的各种知识单元之间存在着大量的因果关系。这是前提和结论之间的关系，可用产生式（或称规则）来表示。其基本形式为：“$P \rightarrow Q$”或“IF P THEN Q”，含义是：如果前提 P 满足，则可推出结论 Q 或执行 Q 所规定的操作；其中 P 是产生式的前提或前件，它给出了该产生式可否使用的先决条件，由实事的逻辑组合构成；Q 是一组结论或后件，它指出当前提 P 满足时，应该推出的结论或应该执行的操作。

对基于规则的产生式可作如下描述（“::=”意为“被定义为”）：

<产生式> ::= <前提>→<结论>

<前提> ::= <简单条件> | <复合条件>

<结论> ::= <实事> | <操作>

<复合条件> ::= <简单条件> AND <简单条件> [（AND <简单条件>）…] | <简单条件> OR <简单条件> [（OR <简单条件>）…]

<操作> ::= <操作名> | [（<变元>…）]

例如：“IF 天阴 AND 空气中湿度很大 THEN 可能要下雨”就是一个产生式。

在“苜蓿病害诊断专家系统”中，苜蓿根部病害诊断过程可用图 10-3 表示，其产生式可表示如下。

R_1：若苜蓿植株根颈未变色并被切断或损伤，易拔出，则病害为根部病害。

R_2：若根颈组织呈黄褐色并软化，死株内有黑色菌核，则病害为根部病害。

R_3：若植株萎蔫下垂，叶片变黄枯萎，常有红紫色变色，先发生在个别枝条上，则病害为根部病害。

R_4：若植株感染根部病害且地上部分黄枯死亡，则病害类型为鼠害或地下虫害。

R_5：若植株感染根部病害且枯萎的茎变褐表面有絮状菌丝，最后变软呈糊状，则病害类型为菌核病。

R_6：若植株感染根部病害且根易拔出，主根维管束变暗褐色，髓部腐烂变空，则病害类型为镰孢萎蔫或根腐病。

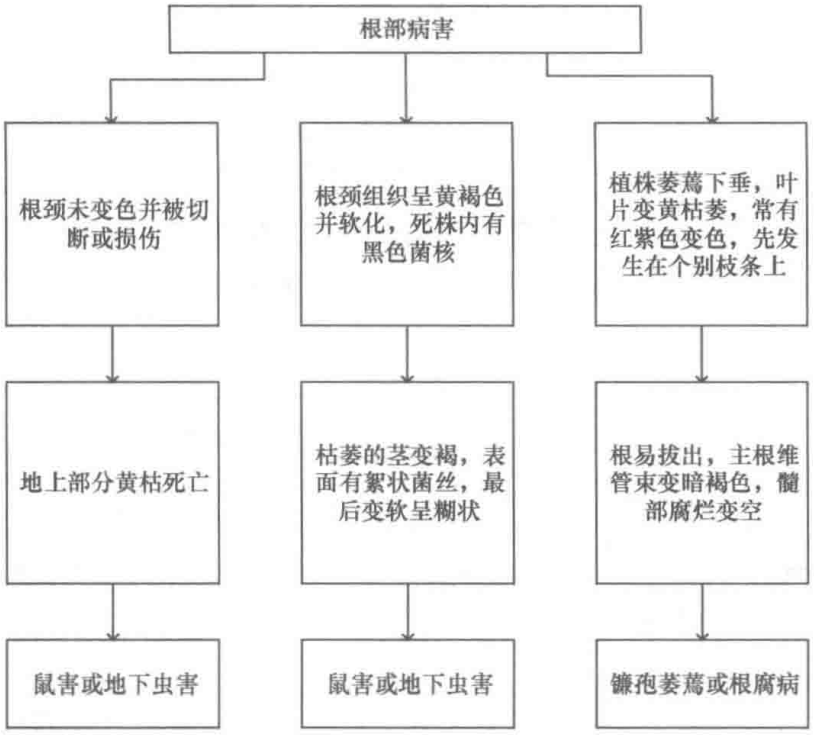


图 10-3　苜蓿根部病害诊断过程

（二）产生式系统的基本结构

一个产生式系统的基本结构包括全局数据库、规则库和控制系统 3 个主要部分。它们之间的关系如图 10-4 所示。

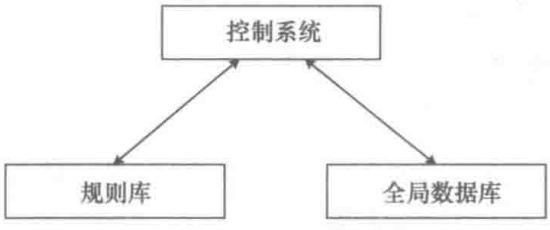


图 10-4　产生式系统的基本结构

1. 全局数据库

全局数据库也称为综合数据库、动态数据库、工作存储器、上下文、黑板等。它是一个数据的集合，是一个用来存放与求解问题有关的各种当前信息的数据结构。它可以是简单数字或数字阵，也可以是非常庞大的文件结构，如问题的初始状态、输入的事实、推理过程中的已知条件、推理得到的中间结论及最终结论等。

2. 规则库

规则库是作用在全局数据库上的一些规则（算子、操作）的集合，相当于系统的知识库。它采用“IF <前件> THEN <后件>”的形式，来表达求解问题所需要的知识。其中，规则的<前件>表达的是该条规则所要满足的条件，规则的<后件>表示的是该规则所得出的结论或者动作。它包含了将问题从初始状态转换成目标状态所需要的所有变换规则。可见，规则库是产生式系统进行问题求解的基础，其知识的完整性、一致性、准确性、灵活性，以及知识组织的合理性等，对规则库的运行效率都有重要影响。

3. 控制系统

控制系统又称为控制策略或者搜索策略，用于控制整个系统的运行，是负责选择规则的决策系统，对应的是控制性知识，任务是对规则集与事实库的匹配过程进行控制，决定问题求解过程的推理线路，使产生式系统能有效地进行问题求解。通常要考虑以下问题：如何选取将规则与事实进行匹配的顺序；如何解决“冲突”协调问题，当有多条规则能与事实库相匹配时，如何选择适当的规则；推理方法的组织，包括如何利用启发知识等。

（三）产生式系统求解问题的基本过程

1）初始化全部数据库，要把解决问题的已知事实送入全局数据库中。

2）检查规则库中是否存在尚未使用过的规则，若有则执行 3）；否则转 7）。

3）检查规则库的未使用规则，是否存在有其前提可与全局数据库中已知事实相匹配的规则，若有则从中选择一个；否则转 6）。

4）执行当前选中规则，并对该规则作上标记，把执行该规则后所得到的结论作为新的事实放入全局数据库；如果该规则的结论是一些操作，则执行这些操作。

5）检查全局数据库中是否包含了该问题的解，若已包含，则说明已求出解，问题求解过程结束；否则转 2）。

6）当规则库中还有未使用的规则，但均不能与全局数据库中的已有事实相匹配时，要求用户进一步提供关于该问题的已知事实，若能提供，则转 2）；否则，说明该问题无解，终止问题求解过程。

7）若知识库中不再有未使用规则，也说明该问题无解，终止问题求解过程（图 10-5）。

需要说明的是，这个过程是不确定的。因为 3）没有明确指出当有多条规则可用时，如何从中选择一条作为当前可执行规则。另外，3）到 5）的循环过程，实际上就是一个搜索过程。

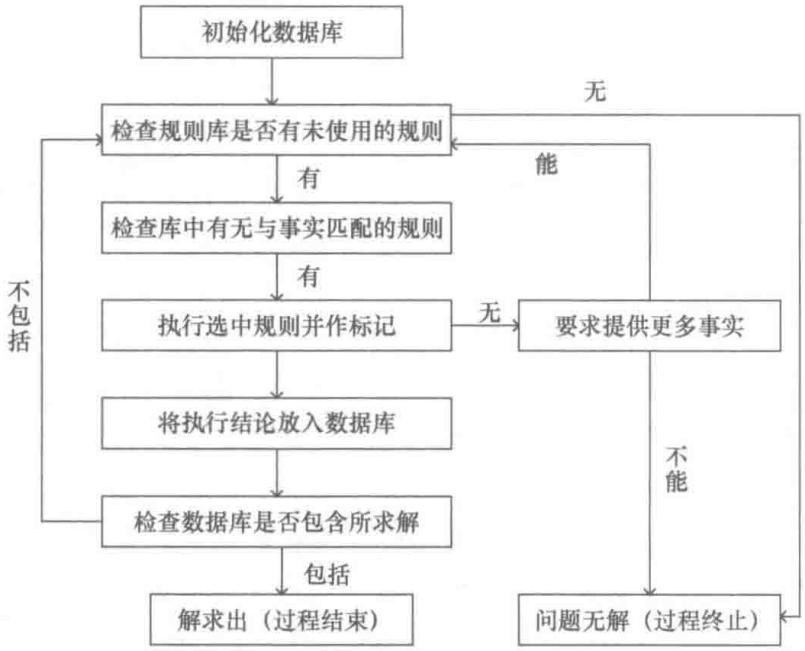


图 10-5　产生式系统求解基本过程

（四）产生式知识表示的性能

1. 产生式表示法的优点

1）模块性好：每条规则具有相同的格式且相对独立。规则的组合、修改、增删比较容易，规则的收集、整理比较方便。规则间的联系仅依赖于上下文的数据结构，它们本身并不相互调用，从而增加了规则的模块性（图 10-6）。

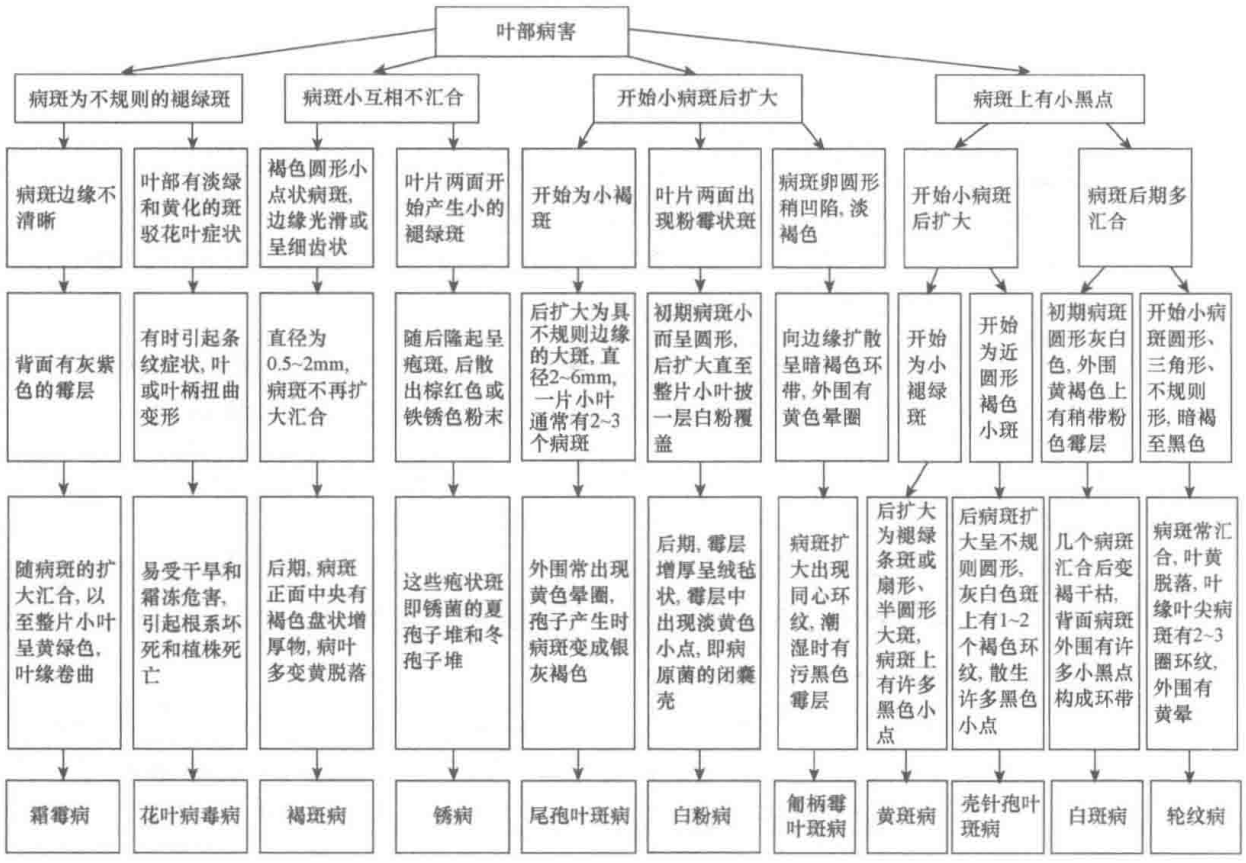


图 10-6　苜蓿叶部病害诊断的产生式知识表示法

2）表达自然性：产生式表示法用“如果……，则……”的形式表示知识，既直观、自然，又便于进行推理。推理过程类似于人类求解问题时的逻辑思维过程。

3）表达有效性：产生式系统具有丰富的知识表示能力，可以用简单直观的规则方式表达人类的经验知识。不仅可以表达知识，还能表达动作。

4）一致性好：规则库中的所有规则都具有相同的格式，并且全局数据库可被所有规则访问，不存在只属于某些规则的局部数据库，因此规则库中的规则可以统一处理。

5）容易排除故障：当系统工作异常时，通过跟踪产生式规则的触发序列，就可容易地发现故障，为系统调试和维护提供便利条件。

6）推理方向具有可逆性：由于产生式规则的前件和后件结构类似，可同时进行正向和反向推理，即混合推理，当解决复杂问题时，可提供有效的框架结构。

7）控制机构具有多样性：可根据对象领域和欲求解问题的特点设计最佳控制机构。

2. 产生式表示法的缺点

1）效率不高：产生式表示的各规则之间的联系必须以全局数据库为媒介，在大型系统的知识库中又导致了产生式检索和匹配的高费用；并且其求解过程是一种反复进行的“匹配-冲突消解-执行”过程，产生式之间的信息传递都依赖于上下文，它难以对事先定义好的操作程序或求解过程需要的捷径推理做出反应。这样的执行方式将导致执行的低效率。

2）非透明性：产生式的推理算法用程序语言表达时明确度不高，问题求解的控制流难以理解。解决效率问题和透明性的方法之一是牺牲系统的部分模块性和清晰性，以换取程序设计语言中的一些优点，如函数调用、子程序嵌套等。

3）解释能力受到局限：产生式系统尽管易于解释其推理过程，但解释也只能重复已启用的产生式组合，而不能从本质上给出问题的原理性解释。

3. 产生式表示法的适用领域

1）知识结构类似于产生式规则的领域并且领域知识是扩散性的，领域内需要有大量的经验知识，不具备精确统一的理论，如医疗诊断系统、故障识别系统、动植物病虫害诊断系统等。

2）可以自然地用产生式规则的后件来表达的领域。该领域知识中包含一系列相互独立的信息，如草地灾害监测系统。

3）领域知识可方便地从应用中分离出来的领域，如树形辨识系统、植物分类学等。

4）若要求解的问题可视为问题空间中一个状态到另一个状态的变换序列，则可用产生式系统求解。例如，修道士和野人问题、梵塔问题、四皇后问题等经典的人工智能问题的求解等。

三、语义网络表示法

语义网络是奎廉（J. R. Quillian）1968 年在研究人类联想记忆时提出的一种心理学模型，这个模型认为记忆是由概念建立的联系实现的。随后，奎廉又把它用作知识表示。

1972 年，西蒙在他的自然语言理解系统中也采用了语义网络表示法。1975 年，亨德里克（G. G. Hendrix）又对全称量词的表示提出了语义网络分区技术。目前，语义网络已在专家系统、自然语言理解等领域得到了广泛的应用。

（一）语义网络的概念

语义一般是指语言结构（如词、短语、句子、段落等）及其意义上的联系。

语义网络是一种用实体及其语义关系来表达知识的有向图，由一组节点和若干条有向弧线构成，节点和弧都可以有标号。节点表示各种事物、对象、概念、情况、属性、状态、事件、行为等；弧表示节点间的语义联系或关系。

从结构上看，语义网络一般是由一些最基本的语义单元构成的，这种最基本的语义单元被称为语义基元。一个语义基元可以用三元组“（节点 1，弧，节点 2）”来表示。如某一三元组的两个节点分别为 A、B，R 为 A 与 B 之间的语义联系，则它所对应的语义基元可表示为 R（“A”，“B”）。当把多个语义基元用相应的语义联系关联在一起时，就形成了一个语义网络。在语义网络中，弧的方向是有意义的，不能随意调换。

（二）知识的语义网络表示

1. 用语义网络表示事实

如图 10-7 所示，这个简单的语义网络所表示的就是“苜蓿、饲草、植物之间的相互关联”的事实。



图 10-7　用语义网络表示事实

2. 用语义网络表示事实之间的关系

如图 10-8 所示，这个语义网络所示的是“岩羊、骆驼、鲨鱼、草鱼”之间的分类关系。

（三）基本语义关系

从功能上讲，语义网络可以描述任何事物之间的任何复杂关系，而这种描述是通过把许多语义基元用基本语义关系关联到一起来实现的，图 10-9 就是有关奶牛养殖基地的一个语义网络。

最常用的基本语义关系有以下几种。

1）类属关系：是指具有共同属性的不同事物间的分类关系、成员关系或实例关系。类属关系的主要特征是属性的继承性，处在具体层的节点可以继承抽象层节点的所有属

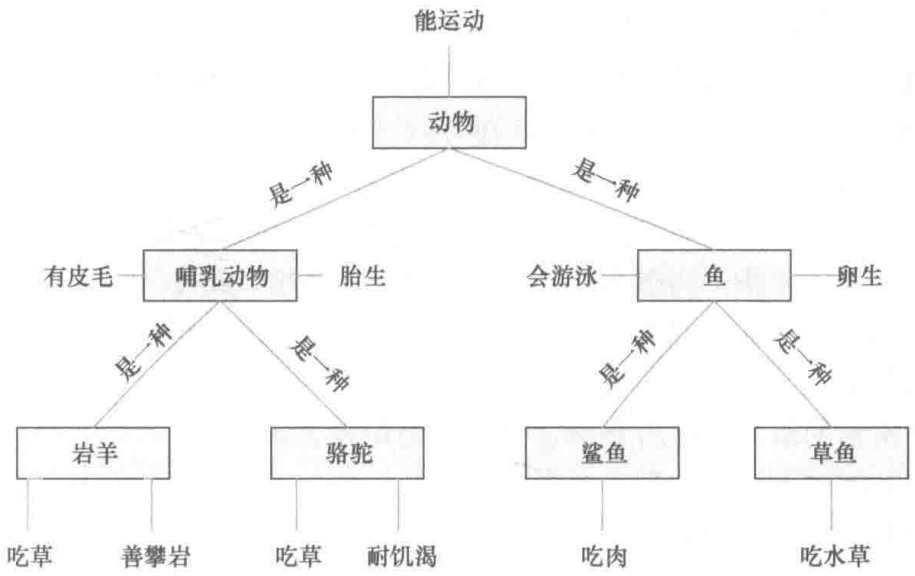


图 10-8　用语义网络表示事实之间的关系

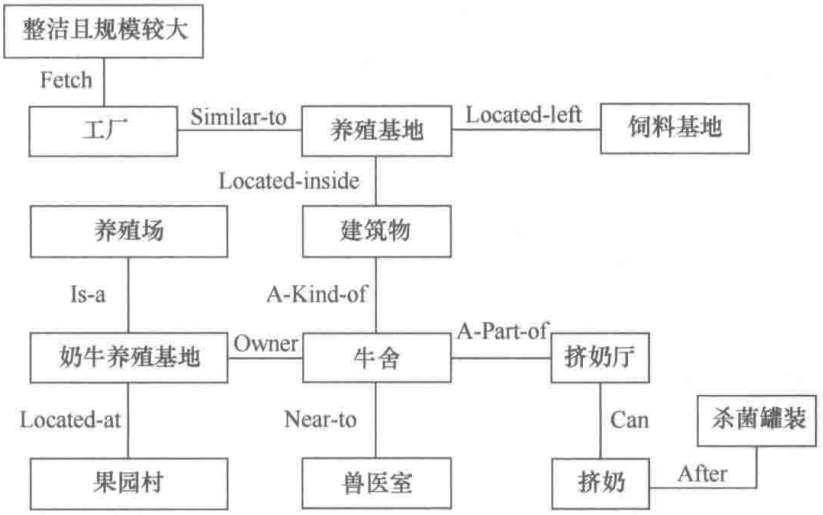


图 10-9　有关奶牛养殖基地的语义网络

性。常用的类属关系有：A-Kind-of（是一种）、A-Member-of（是一员）、Is-a（是一个）。如图 10-9 所示，牛舍是一种建筑物、奶牛养殖基地是一个养殖场，就属于类属关系。

2）包含关系：也称为聚类关系，是指具有组织或结构特征的“部分与整体”之间的关系。它和类属关系的最主要区别是包含关系一般不具备属性的继承性。常用的包含关系有：A-Part-of（是一部分）。在图 10-9 中，挤奶厅是牛舍的一部分，就属于包含关系。

3）属性关系：是指事物和其属性之间的关系。常用的属性关系有：Have（有）、Can（能、会）、Owner（所有者）。在图 10-9 中，牛舍属于奶牛养殖基地、挤奶厅能够用来挤奶是属性关系。

4）时间关系：是指不同事件在其发生时间方面的先后次序关系。常用的时间关系有 Before（在前）、After（在后）。在图 10-9 中，挤奶后要进行牛奶罐装属于时间关系。

5）推论关系：如果一个概念可由另一个概念推出，两个概念间存在因果关系，则称它们之间是推论关系。推论关系用 Fetch（推出）表示。在图 10-9 中，由于养殖基地

像工厂推出整洁且规模较大属于推论关系。

6）位置关系：是指不同事物在位置方面的关系。常用的位置关系有 Located-on（在上）、Located-at（在）、Located-under（在下）、Located-inside（在内）、Located-outside（在外）、Located-left（在左）、Located-right（在右）。在图 10-9 中，奶牛养殖基地位于果园村、牛舍在养殖基地内、养殖基地在饲料基地的左侧属于位置关系。

7）相近关系：是指不同事物在形状、内容等方面相似或接近。常用的相近关系有：Similar-to（相似）、Near-to（接近）。在图 10-9 中，养殖基地像工厂、兽医室在牛舍附近属于相近关系。

图 10-9 所示的语义网络用 Prolog 语言的语句表达如下

Located-left（“养殖基地”、“饲料基地”）

Located-inside（“建筑物”、“养殖基地”）

Located-at（“奶牛养殖基地”、“果园村”）

Similar-to（“养殖基地”、“工厂”）

Fetch（“工厂”、“整洁且规模较大”）

A-Kind-of（“牛舍”、“建筑物”）

A-Part-of（“挤奶厅”、“牛舍”）

Is-a（“奶牛养殖基地”、“养殖场”）

Owner（“牛舍”、“奶牛养殖基地”）

Near-to（“牛舍”、“兽医室”）

After（“挤奶”、“牛奶罐装”）

Can（“挤奶厅”、“挤奶”）

（四）语义网络的推理

目前，大多数语义网络所采用的推理机制主要有两种，即匹配和继承。

1. 匹配

匹配就是在知识库的语义网络中寻找与待求解问题相符的语义网络模式。由于事物是通过语义网络这种结构来描述的，事物的匹配则为结构上的匹配，包括节点和弧的匹配。用匹配的方法进行推理时，首先构造问题的目标网络块，然后在事实网络中寻找匹配。推理从一条弧连接的两个节点的匹配开始，再匹配与该两个节点相连接的所有其他节点，直到问题得到解答。下面以图 10-10 所示的语义网络片段为例说明。

假设在知识库中存放着如图 10-10 所示的语义网络片段，问挤奶之后要做什么。

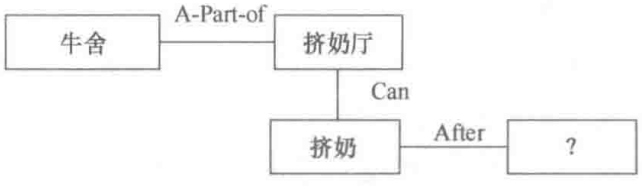


图 10-10　语义网络片段

根据问题的要求，构造如图 10-10 所示的语义网络片段，然后将该片段和图 10-9 所示的语义网络进行匹配，由“After”弧所指的节点可知，挤奶后要进行杀菌罐装，于是得到问题的答案。如果还想知道挤奶厅的其他情况，可以通过在语义网络中增加空节点来实现。

当事实语义网络较复杂时，进行匹配时要加入含有启发性知识的选择器函数，选择器函数中包含事实网络中哪些节点和弧，可以优先考虑匹配和这样匹配的建议，这种选择器函数能加速匹配的搜索过程。

2. 继承

继承是指把对事物的描述从抽象节点传递到具体节点。通过继承可以得到所需节点的一些属性值，它通常是沿着 Is-a、A-Kind-of 等继承弧进行的。继承的一般过程为以下几部分。

1）建立节点表：节点表中存放着待求解节点和所有 Is-a、A-Kind-of 等继承弧与此节点相连的节点。初始情况下，表中只有待求解节点。

2）检查是否有继承弧：从第一个节点开始，检查是否有继承弧，如果有，就把该弧所指的所有节点放入节点表的末尾，记录这些节点的所有属性，并从节点表中删除第一个节点。如果没有，仅从节点表中删除第一个节点。

3）重复步骤 2），直至节点表为空：此时记录下来的所有属性都是待求解节点继承来的属性。

例如，在图 10-10 所示的语义网络中，通过继承关系可以得到：牛舍是个建筑物，它属于奶牛养殖基地，有挤奶厅，在兽医室附近。

（五）语义网络表示法的特征

1. 语义网络法的优点

1）知识的深化表达：语义网络能把实体的结构、属性及实体间的因果联系简洁明确地表达出来。由于可执行语义搜索使得与一个实体相关的事实、特征、关系可以通过相应节点的弧推导出来，因而通过与某一节点连接的弧可以很容易地找出与该节点有关的信息，而不必遍历整个庞大的知识库，从而可以避免组合爆炸。

2）知识的联想性：语义网络本来就是以人类联想记忆为模型提出来的，它着重强调事物间的语义联系，体现了人类的联想思维过程。

3）知识的自燃性：语义网络实质上是一个带有标识的有向图，它以自然的构架直观地把知识表示出来，比较符合人们表达事物间关系的习惯，同时也容易实现与语义网络之间的相互转换。

4）知识的组织化结构：在语义网络结构化的知识表示方法中，下层节点可以继承、新增和变异上层节点的属性，因而容易被询问和学习，实现信息共享。

2. 语义网络法的缺点

1）形式简单：语义网络表示法的形式比较简单，只能用节点代表各种事物，用弧

代表事物间的所有联系，在表达现实世界时显然有一定的局限性。

2）管理维护复杂：在语义网络表示法中，联系的增加会大大增加语义网络的复杂程度，相应地，知识的存储和检索过程也变得更为繁琐，从而使语义网络的管理和维护的复杂性增加。

3）节点和弧缺乏术语标准：语义网络本身没有赋予其节点和弧以确切的含义，缺乏标准术语和约定。推理过程中有时不能明确区分“类”和“个体”。如一个节点标记为“羊”，那么它究竟是指“羊”这个概念，还是所有“羊”的集合，或是某一只特定的羊呢？一个节点可以赋予不同的解释，而系统设计者可决定节点的具体特性。

四、面向对象表示法

面向对象的知识表示方法将多种单一的知识表示方法（规则、框架等）按照面向对象的程序设计原则组成一种混合知识表达形式，即以对象为中心，将对象的属性、动态行为、领域知识和处理方法等有关知识“封装”在表达对象的结构中。这种方法将对象的概念和对象的性质结合在一起，符合专家对领域对象的认知模式。

（一）面向对象表示法概述

1. 基本概念

面向对象是20世纪末发展起来的一种先进的软件设计方法，是一种程序设计范型，同时也是一种程序开发的方法。对象指的是类的实例，它将对象作为程序的基本单元，将程序和数据封装其中，以提高软件的重用性、灵活性和扩展性。

在面向对象的程序设计中，有以下几个基本概念。

1）对象：是面向对象程序设计的核心概念。它是面向对象系统中的基本视图，由一组操作（也称方法）和记忆操作结果的局部共享状态（也称为属性）构成。因此，对象是把数据和操作该数据的代码封装在一起的实体。对象具有特殊的属性和行为方式。

2）类：是一种对象类型，它描述属于该类型对象的共同特性，这种特性包括操作特性和存储特性。类中的每一个对象作为该类的一个实例，成为一个成员对象。类具有继承性，一个类可以是某一个类的子类，从而从父类那里继承所有的特性。

3）消息：是对象之间相互请求或相互协作的途径，是要求某个对象执行其中某个功能的说明，对象间的联系只能通过消息的传递来进行。某一对象在执行相应的操作时，又可以请求其他对象完成某种操作。对象只有在收到消息时才被激活。

4）方法：是对对象实施各种操作的说明，也就是消息的具体实现。消息中只包含发送对象的操作要求，而不包含如何完成操作的具体方法。在面向对象程序设计中，方法就是函数的定义。

2. 主要特征

1）封装性：封装的目的在于将对象的使用者和设计者分开，其实质是将对象的数据和操作包装在一起，从而使对象具有包含和隐藏信息的能力。一个对象好像是一个不

透明的黑盒子，表示对象状态的数据（对象的属性）和实现各个操作的代码（对象的方法）都被封装在黑盒子里面，对外界完全封闭。它与外界的联系是通过方法来实现的，方法就是对象的对外接口。同时，外面的对象也不需要关心方法如何进行处理，只要知道调用方法需要什么参数，以及方法能够返回什么样的结果就可以了。

2）继承性：继承是一种联结类与类的层次模型，它提供了一种明确表述共性的方法，允许和鼓励类的重用。继承是指基于现有的类（称为父类或基类）创建新类（称为子类或派生类）的机制。子类继承基类的某些属性、方法、事件，并可以附加新的属性和方法，以进行优化。继承所具有的作用有两个方面，一是可以减少代码冗余，二是可以通过协调性来减少相互之间的接口和界面。

3）多态性：是指类为方法提供不同的实现方式，但可以用相同的名称调用的功能。它有两个方面的含义，一种是将同一个消息发送给同一个对象，但由于消息的参数不同，对象也表现出不同的行为（通过重载实现），另一种是将同一个消息发送给不同的对象，各对象表现出的行为各不相同（通过重写实现）。

3. 基本形式

用面向对象的方法表示的知识系统中，对象的静态属性就是对象具有知识，而对知识的处理方法和操作就是该对象所具有的行为，因此，一个从客观世界抽象出来的对象可表示为：<对象>::=（ID，DS，MS，MI），其中 ID 是对象的标识符，即对象名；DS 是对象的数据结构，描述对象的静态属性；MS 是对象的方法，用于说明对象提供的对静态数据进行处理的方法操作，对象的数据只能由其具体操作来改变，其他对象不能操纵，从而体现了面向对象方法所具有的信息隐蔽性，即封装性；MI 作为对象的消息接口，用于接收外部信息和驱动内部相关操作及产生向外的输出信息，问题的求解就是依靠对象间传递消息完成的。

面向对象设计需要将一组客观对象具有的共同特征抽象出来，即采用从特殊到一般的归纳方法构造类，为系统构成提供同一类对象之间代码共享的手段。此外，面向对象设计还是一个建立类层次的过程，派生类通过继承机制从较简单的基类中继承特征，实现代码重用，为系统构成提供类之间代码共享的手段。用面向对象方法表示知识时需要对类进行描述，具体描述形式如下

Class <类名>[：<Superclass>]
　　[<类变量表>]
　　Structure
<对象静态结构描述>
　　Method
<对象的操作定义>
　　Restraint
[<限制条件>]
END

其中，类名是系统中类的唯一标识，如果该类是由其他类继承而来，则 Superclass 指出