其基类名字，<类变量表>给出类所有对象所共享的一组变量，<对象静态结构描述>用于描述类对象的数据结构，<对象的操作定义>给出对类对象可进行的操作和方法，也可以是一组规则，<限制条件>指出该类对象应满足的限制条件。

（二）面向对象表示法的推理机制

草业专家解决领域问题的能力主要体现在两个方面：一是拥有大量的专业知识，二是具有选择知识来解决问题的能力。知识库和推理机是草业专家系统必不可少的组成部分，是基于知识的推理的基础和核心。以苜蓿病害诊断为例，病害的推理过程即根据病灶表现，利用知识库中的知识，采用某种推理策略得到病害的类型。在面向对象的知识表示方法中，知识对象将实体属性、知识及知识处理方法封装在一起，知识对象通过消息（接口）与外部发生联系，整个推理过程就是消息在各对象之间传递的过程。

面向对象的推理过程是知识对象类的实例化过程，如果传递到知识对象的消息触发了其方法，则该知识对象被激活。知识对象类实例化一个知识对象的过程是：如果该对象还包含其他对象类作为自己的成员，则首先实例化那些对象，然后进行属性填充、继承、过程调用等方法获取知识，建立起一个新对象。对象创建后开始进行推理，推理首先在对象内部进行，也就是在知识对象内部，确定导致该知识对象对应的结构元素出现病灶的子结构或产生病灶的同层次的其他结构元素，如果是子结构病灶，说明病害发生在对象所在实体，则引导系统向下一层次进行诊断；若是同层次的其他结构元素产生病灶，则转到同层次的其他知识对象进行诊断推理。按上述方法将推理一直进行下去，直到得到诊断结果。整个推理过程可以表示成一个树形结构，树的叶子结点就是诊断的结果。

（三）面向对象表示法的优缺点

1. 优点

1）分解性更好：面向对象表示法较为符合习惯的思维方法，便于分解大型的复杂多变的问题。由于对象对应于现实世界中的实体，因而可以很自然地按照现实世界中处理实体的方法来处理对象，知识工程师可以很方便地与专家进行沟通和交流。

2）维护性能高：采用面向对象思想设计的结构，可读性高。由于继承的存在，即使改变需求，维护也只是在局部模块，所以维护起来是非常方便且成本较低。

3）可重用性强：由于功能被封装在类中，并且类作为独立的实体而存在，所以提供一个类库就非常简单了。类库不但有很广泛的编程语言适用性和多功能性，而且可以很容易地通过提供符合需求的类来扩充这些功能。

2. 缺点

1）面向对象程序设计方法所涉及的概念都很抽象，对概念的描述也不够成熟，许多基本概念还没有统一权威的标准定义，可供用户使用的类也是种类繁多、结构复杂，而代码编程部分又需要许多传统程序设计的思想，对初学者来说直接学习面向对象程序设计有一定的困难。

2）虽然类库中提供的类都是经过精心设计、测试过的，但很难保证类库中的每个类在各种环境中百分之百正确，如果应用程序中使用了类库中某个存在问题的类，当经过几层继承后错误才显现出来，这时软件工程师对此将束手无策，有可能要推翻原来的全部工作。

五、框架表示法

框架表示法是在框架理论的基础上发展起来的一种结构化知识表示方法。框架理论认为人们对现实世界中各种事物的认识都是以一种类似于框架的结构存储在记忆中的，当遇到一个新事物时，就从记忆中找出一个合适的框架，并根据新的情况对其细节加以修改、补充，从而形成对这个新事物的认识。

（一）框架表示法的概念与设计

1. 概念

框架是一种描述对象（事物、事件或概念等）属性的数据结构。即当新情况发生时，人们只要把新的数据加入到该通用数据结构中便形成一个具体的实体，这样的通用数据结构就称为框架。框架是知识表示的基本单位。

实例框架：对于一个框架，当人们把观察或认识到的具体细节填入后，就得到了该框架的一个具体实例，框架的这种具体实例被称为实例框架。

框架系统：由一组框架节点及其相互关系组成的一个结构化整体。

框架系统推理：由框架之间的协调来完成。

框架表示方法是一种层次的、组合式的知识表示方法。它可以在统一的知识表示环境中综合使用说明型和过程型描述的方法。它具有面向对象、匹配和性质继承等特点，已发展成为一种通用的表示方法。

2. 框架表示法的设计思路

1）依据要表示的问题定义框架名。

2）为了表现事物关联信息及各部分细节，框架可包含若干子框架；主框架表示主问题，子框架表示子问题。

3）赋以槽号和指针加以连接。

4）每一框架还可以划分侧面，有侧面名和值加以区分。

5）列举数据项与记录值，如相关槽值、侧面值等表示属性和特征。

3. 框架表示法的设计步骤

1）框架知识学习：对当前事物或对象进行观察与分析，把要认识的对象与选定的框架知识表示进行比对，完成对象属性及其知识的学习和了解。

2）建立框架模式与概念：依据以往的经验，可在脑海的记忆中勾画出一个粗略的框架模式，予以装配，并给定一个框架表示其概念。

3）框架的资料数值填写：在对该事物有了更加全面深入的了解后，再依据现实情

况比照框架体的细节加以替换、修改和补充，按照框架的数据项（所定义的框架槽名和框架的侧面名）的要求，完成相关对象属性及其知识等资料数值的填写，以便逐步形成一个完整而具体的框架结构。

4. 框架表示法主要优缺点

1）结构化的知识表示：最突出的特点是善于表示结构性知识，它能够把知识的内部结构关系及知识间的特殊联系表示出来。框架结构可以表现人类经验和抽象思维的特性，每一个框架就是一个独立的知识单元，形成一个相对独立的知识模块，这样的模块具有直观、描述层次简洁、易于扩充、修改等优点。

2）可使用模式匹配的推理：框架表示法发挥了人、机都可采用的模式匹配的经验手段来模拟推理，巧妙地利用了人、机都可以进行细微比较的智能，又可以按照框架的多方面多层次分别进行模式匹配，便于控制推理过程的精度和效率。

3）支持上、下层框架属性知识表达的继承：在框架系统中，下层框架可以继承上层框架的槽值，也可以进行补充和修改，这样不仅可以减少知识的冗余，而且还比较好地保证了知识一致性。

4）自然性：框架系统对知识的描述是把某个实体或实体集相关特性都集中在一起，从而高度模拟了人脑对实体多方面、多层次的存储结构，直观自然、易于理解。

5）主要缺点：框架表示法过于死板，难以描述诸如机器和人纠纷等类问题的动态交互过程，且对过程性知识表示的清晰度难以保证。

（二）框架的基本结构和描述

1. 框架基本结构的一般描述

一个框架由若干个槽（Slot）组成，一个槽有一个槽值或若干个侧面，而每一个侧面又有若干个侧面值，其中槽值和侧面值可以是数值、字符串、布尔值，也可以是一个动作或过程，甚至还可以是另一个框架的名字。在一个框架系统中，一般都含有多个框架，对于不同的框架应赋予不同的名字，同样，对于不同槽和侧面也需要给予相应的槽名和侧面名。

槽用于描述对象某一方面的属性；侧面用于描述相应属性的一个方面。槽和侧面所具有的属性值分别被称为槽值和属性值。

一个框架的基本结构如下

〈框架名〉

〈槽名 1〉〈槽值 1〉 | 〈侧面名 11〉〈侧面名 111，侧面值 112，…〉

〈侧面名 12〉〈侧面名 121，侧面值 122，…〉

⋮

〈槽名 2〉〈槽值 2〉 | 〈侧面名 21〉〈侧面名 211，侧面值 212，…〉

〈侧面名 22〉〈侧面名 221，侧面值 222，…〉

⋮

⋮

〈槽名 k〉〈槽值 k〉 | 〈侧面名 k1〉〈侧面名 k11，侧面值 k12，…〉
〈侧面名 k2〉〈侧面名 k21，侧面值 k22，…〉

⋮

〈约束〉

〈约束条件 1〉　〈约束条件 2〉…　〈约束条件 m〉

其中，约束条件是为了给框架、槽或侧面附加说明。这些说明信息用来指出什么样的值才能填入到槽或侧面中去。

2. 框架结构的示例

上面是框架的一般结构，对一个特定的问题而言，需要给出一个适合于该问题的具体框架。

下面就是一个描述能繁母牛有关情况的框架。

框架名：〈能繁母牛〉

编号：单位（号码）

年龄：单位（岁）

条件：岁＞2

体重：单位（kg）

母牛：〈能繁母牛〉

受胎次数：单位（次）

产犊次数：单位（次）

首次发情时间：单位（年月）

首次受胎时间：单位（年月）

首次产犊时间：单位（年月）

产犊时限：单位（年）

默认：10 年

此框架共有 10 个槽，分别描述了能繁母牛 10 个方面的情况。每个槽中的说明信息，用来描述填写槽值的一些格式限制。其中，“单位”用来说明填写槽值时的格式；“〈 〉”表示由它括起来的是框架名，如“母牛”槽的槽值是另一个框架的框架名“能繁母牛”；“默认”说明当相应槽没填入槽值时以其默认值作为该槽的槽值，如“产犊时限”槽，当没填入任何信息时，就以缺省值“10 年”作为该槽的槽值；“条件”用来说明所填槽值应该满足的限制条件，如对“年龄”槽，限制了能繁母牛的年龄应该大于 2 岁。

对于一个框架，当把具体信息填入槽或侧面后，就得到该框架的一个实例框架。下面是软课题评审专家框架的一个实例框架。

框架名：〈012 号能繁母牛〉

编号：2012012

年龄：4

体重：400kg
母牛：〈012 号能繁母牛〉
受胎次数：3
产犊次数：2
首次发情时间：2012 年 4 月
首次受胎时间：2012 年 5 月
首次产犊时间：2013 年 1 月
产犊时限：

在这个实例框架中 “产犊时限”的槽值为空，表示取默认值“10 年”。“母牛”槽的槽值为“012 号能繁母牛”，表示对子框架“012 号能繁母牛”的调用。

从上述 2 个例子可以看出，前者描述的是一个概念，后者描述的是一个具体的事物，是前者的一个实例。这就是说，这两个框架之间存在一种层次关系。一般称前者为上位框架（或父框架），后者为下位框架（或子框架）。

（三）框架系统的推理和求解过程

1. 框架系统的基本结构

当要表示的知识比较复杂时，需要把多个相互联系框架组织起来，形成一个框架系统。

框架系统的基本结构是通过各框架之间的横向或纵向联系来实现的。由于一个框架的槽值或侧面值可以是另一个框架的名字，这就使框架之间建立起了联系，这种联系称为框架之间的横向联系。当用框架表示具有演绎关系的知识结构时，下层框架与上层框架之间则为纵向联系，两者之间存在继承关系。

2. 框架系统的推理

与语义网络系统一样，框架系统也可以进行特性的继承和匹配。框架系统继承，就是子框架可以拥有父框架的槽及槽值。实现继承的操作有匹配、搜索和填槽。匹配就是问题框架同知识库中的框架的模式匹配，所谓问题框架就是用框架形式所表示的待求解问题，如果其与知识库中已有的框架匹配成功，则可获得有关信息。搜索就是沿着框架间的纵向和横向联系，在框架系统中进行相关信息的查找。填槽就是当候选框架确定之后，按照该框架中各个槽的次序填写具体的槽值。此外，由于框架用于描述具有固定格式的事物、动作和事件，因此可以在新的情况下推论出未被观察到的事实。

需要说明的是，框架的匹配实际上是通过相应槽的槽名和槽值逐个进行比较来实现的。如果两个框架的各个对应槽没有矛盾，或者满足预先规定的某些条件，就认为两个框架可以匹配。由于一个框架所描述的某些属性及值可能是从它的上层框架继承过来的，因而两个框架的比较往往会涉及它们的父框架或祖先框架，这就增加了匹配的复杂性。

3. 框架系统问题的求解过程

框架系统的问题求解过程一般按照以下步骤进行。

1）把待求解的问题用框架表示出来。

2）把这个框架与知识库中已有框架进行匹配，找出一个或多个候选框架，并在这些候选框架引导下进一步获取附加信息，填充尽量多的槽值，以建立一个描述当前情况的实例。如果该候选框架可以找到满足要求的填充值，就把它们填入该候选框架的相应槽中。如果找不到合适的填充值，就选择新的框架。

3）用某种评价方法对候选框架进行评价，以决定是否接受该框架，如接受则问题求解结束。

第四节　草业专家系统的建立

在对知识获取和表达有了一定的了解之后，本节从知识库和模型库的构建、系统的调试与修改、系统开发工具与环境等三个方面对草业专家系统的建立进行简要的介绍，要了解相关的详细内容，可以参考人工智能方面的专业论著。此外，本节最后对草业专家系统的应用领域及发展趋势进行概述。

一、草业专家系统知识库与模型库的构建

（一）知识库与数据库的关系

知识库与数据库之间既有区别又有联系，二者的联系表现为以下两方面。

1）在专家系统建立的实际工作中，数据库有可能以事实库的形式成为模型库的组成部分，在特定情况下，还可以将知识库的一部分转化为等效的数据库。

2）专家系统的知识库在低层次实现技术方面，可以借鉴成熟的数据库技术。

知识库与数据库的区别在于以下两部分。

1）应用的对象不同。数据库用于普通信息管理，其目标在于有效地存储和检索大量数据；知识库用于智能信息的处理，即进行人工智能问题的求解。

2）数据库和知识库的组成及工作方式不同。简单来说可以用以下两个式子表示：数据库=事实的直接表达+查询检索；知识库=知识的直接或间接表达+推理或启发式搜索。

（二）知识库的构建方法

知识库的建立大致有三种方法：第一种利用知识库编辑模块建立知识库；第二种利用学习算法模块建立知识库；第三种利用知识库管理系统建立知识库。

1. 利用知识库编辑模块建立知识库

利用知识库编辑模块建立知识库的流程是：首先通过规定的形式化文本表示模式的输入格式和组织知识结构的录入控制机制，将概念化文本转换为形式化新文本，其次进

入知识库编辑模块对录入的知识进行语法、句法的检验，最后根据检验结果对其进行编辑、插入、删除、修改和显示等。一般来说，诊断类专家系统中的知识库主要是采用这种方法建立的。

2. 利用学习算法模块建立知识库

利用学习算法模块建立知识库是一种智能的自动化获取及建库模式，其具体流程是：首先按照学习算法模块规定的输入格式将形式化学习文本录入，在计算机内自动生成特定数据结构的知识；然后这些知识在知识入库控制模块中根据知识库的组织结构，检查新生成知识的合法性，把学习所得的知识存入知识库的相应位置，完成知识库的建立。对于知识库中知识的显示、修改、删除、插入及语法和语义的检查，则由在特定的知识库组织结构的知识表示模式控制下的知识管理模块来完成。随着各种计算机算法的不断发展，知识库的建立将会越来越多地用到这种方法。

3. 利用知识库管理系统构建知识库

知识库管理系统主要由 4 个模块组成：推理机模块、知识获取/学习模块、知识库维护模块和用户智能接口。利用知识库管理系统建立知识库的流程类似于用数据库管理系统建立数据库，具体流程是：首先用知识库管理系统定义知识库的结构和知识表示模式，然后将形式化文本录入知识库管理系统，通过该系统实现对知识的查询、浏览、删除、修改等基本管理，以及知识一致性、完整性和冗余的检查。

早期的专家系统，尤其是诊断类专家系统一般利用知识库编辑模块建立知识库，随着计算机软件技术的不断发展，越来越多的专家系统利用学习算法模块和知识库管理系统建立知识库。

（三）模型库概述

1. 模型库的概念

模型库是将众多的模型按照一定的结构组织起来，通过模型库管理系统对各个模型进行有效管理和使用的计算机程序（刘铁梅和谢国生，2010）。模型库中的模型不仅可被不同系统共同调用，而且还可组合成综合性模型。

根据模型的表达形式，可将模型库中的模型分为数学模型、数据处理模型、图形图像模型、报表模型和智能模型。草业专家系统的模型库，主要由草业系统模拟模型构成。

2. 草业系统模拟模型

草业系统模拟模型就是综合利用系统分析方法、计算机模拟技术及草业科学、气象、土壤、生态等学科的理论和研究成果，以由牧草、家畜、环境、技术、经济等要素构成的草业系统为研究对象，通过建立数学模型来描述牧草（或家畜）个体（或群体）的生长发育、产量形成、质量指标与各要素之间的数学关系，并在计算机上进行模拟的软件程序。

较为理想的草业系统模拟模型，能够在兼顾通用性、灵活性、研究性和经济性的基

础上，综合运用各学科的原理和知识，对系统各要素之间物质、能量和信息传递的机制进行模拟，获得系统行为较为可靠的定量预测结果，为生产决策提供依据。

（四）草业系统模拟模型的建立

草业系统模拟模型建立要经过模型选择与系统定义、资料获取与算法构建、模块设计与模型实现、模型检验与改进 4 个步骤才能完成。重点和难点是在深入解析和科学把握系统内涵与特征的基础上，研究和建立草业系统模拟模型的算法结构。

在模型选择与系统定义阶段，首先要弄清模拟研究的目的、水平及对象，以明确模拟的范围和层次。如果建模的主要目的是为了研究和机制解释，那么模拟的系统水平和层次就应该低一些；对于一个应用性较强或注重宏观预测的模型，研究的系统水平就可以高一些。通过这项工作，可以先建立一个描述系统结构与关系的概念模型。

资料获取的来源大致有 3 个方面：一是已有的工作积累或文献资料，二是通过合作途径从同行科学家得到的相关资料，三是通过补充试验或支持研究，围绕某个主题获得的全新资料。在获取的这些资料基础上，选择恰当的数学关系式并对关系式中的参数进行模拟推算，完成算法构建。

模块设计与模型实现，首先要选择恰当的模拟算法和界面编程语言进行系统的组织；其次要将主程序和子程序设置成模块化结构，突出模块的可读性和解释性、可改性和灵活性；最后，模型要有友好的人机界面和较强的可操作性。

模型的检验包括对模型的核实、校准与检验；模型的改进则是在检验模型的过程中，对模型进行必要的改进与完善。

（五）模型库管理系统

模型库管理系统由模型管理系统、知识管理系统、数据交换器及解释分析系统构成。它对模型的存储、运行和组合进行管理，模型存储管理的内容包括模型的表示、存储的组织结构、维护和查询，模型运行管理的内容包括模型程序输入和编译、运行控制及数据的存取。

模型管理系统用来完成模型的生成、修改、更新、检索和调用等。知识管理系统则存放有关模型的使用条件约束、模型间关联的方式、模型参数的顺序及格式说明和模型组合构造规则等。数据交换器以数据库和人机交互界面来处理提取模型调用操作所需数据或构建新模型，并使用人机交互方法得到的模型表达式来描述信息。解释分析系统对人机交互系统所发出的操作模型的命令进行语义分析，实现模型的调用、修改、删除、关联组合等。

二、草业专家系统的调试与修改

（一）系统调试与修改概述

对于程序编写完成、成功进行系统测试并从中发现错误的草业专家系统，还需要进行系统调试，其目的是确定错误的原因和位置，并改正错误。调试工作的困难与人的心

理因素和技术因素都有关系，需要系统开发和管理人员的脑力劳动与丰富经验。常用的调试方法除简单的调试方法外，还有归纳法调试、演绎法调试等。

（二）简单的调试方法

1. 在程序中插入打印语句

在程序中插入打印语句，可以显示程序的动态过程，比较容易检查源程序的有关信息。但效率低，可能输出大量的无关数据，发现错误带有偶然性。同时还要修改程序，这种修改可能会掩盖错误、改变关键的时间关系或把新的错误引入程序。

2. 运行部分程序

有时为了测试某些被怀疑为有错的程序段，整个程序反复执行多次，使很多时间浪费在执行已经是正确的程序段上，在此情况下，应设法使被测试程序只执行需要检查的程序段，以提高效率。

3. 借助于调试工具

大多数程序设计语言都有专门的调试工具，可以利用这些工具分析程序的动态行为。例如，借助“追踪”功能可以追踪子程序调用、循环与分支执行路径、特定变量的变化情况等，利用“断点”可以执行特定语句或改变特定变量值引起的程序中断，以便检查程序的当前状态，还可借助调试工具观察或输出内存变量的值，提高调试程序的效率。

（三）归纳法调试

归纳法是一种从特殊到一般的思维过程，从对个别事例的认识当中，概括出共同特点，得出一般性规律的思考方法。归纳法调试从测试结果发现的线索入手，分析它们之间的联系，导出错误原因的假设，然后再证明或否定这个假设。归纳法调试的具体步骤如下。

1）收集有关数据。列出程序“做对了什么”、“做错了什么”的全部信息。

2）组织数据。整理数据以便发现规律，使用分类法构造一张线索表。

3）提出假设。分析线索之间的关系，导出一个或多个错误原因的假设。

4）证明假设。假设不是事实，需要证明假设是否合理。如果不能证明这个假设成立，需要提出下一个假设。

（四）演绎法调试

演绎法是一种从一般的推测和前提出发，运用排除和推断过程做出结论的思考方法。演绎法调试是列出所有可能的错误原因的假设，然后利用测试数据排除不适当的假设，最后再用测试数据验证剩余的假设确定出错的原因。演绎法调试的具体步骤如下。

1）列出所有可能的错误原因的假设。把可能的错误原因列成表，不需要完全解释，仅是一些可能因素的假设。

2）排除不适当的假设。仔细分析已有的数据，寻找矛盾，力求排除前一步列出的

所有原因。

3）精化剩余的假设。利用已知的线索，进一步求精余下的假设，使之更具体化，以便可以精确地确定出错位置。

4）证明余下的假设。做法与归纳法相同。

三、草业专家系统的开发工具与环境

（一）专家系统开发工具与环境

草业专家系统开发工具与环境是一种为高效率开发草业专家系统而设计的高级程序系统或高级程序设计语言环境。目前，专家系统的开发工具与环境主要有 5 种类型：程序设计语言、知识工程语言、辅助型工具、支持工具及开发环境。总的说来，专家系统的建造方法可以分为利用计算机高级语言编写建造、利用计算机程序设计环境编写建造、利用计算机程序设计工具建造 3 类。

（二）专家系统的语言型工具

1. 程序设计语言

程序设计语言包括符号处理语言和面向对象的语言。符号处理语言是为人工智能应用而专门设计的语言，它包括以 LISP 为代表的函数型语言和以 Prolog 为代表的逻辑型语言。C ++和 Java 则是面向对象的程序设计语言的代表，这些语言以其类、对象、继承等机制，与草业专家系统的知识表达与知识库建设有很好的联系。

C ++既是一种面向对象的程序设计语言，又是一种很好的符号处理语言，以其强大的功能和面向对象的特征在草业专家系统开发中具有很好的应用前景。集 Visual C ++和 Visual J ++于一体的 Visual Studio 程序软件设计包，可以为草业专家系统的多媒体信息处理、可视化界面设计、基于网络的分布式运用等提供良好的语言环境。此外，对于基于网络的分布式多专家协同的专家系统的开发，ASP.net 也是常用的语言工具。

2. 知识工程语言

知识工程语言是一类专门用来建造和调试专家系统的语言，是为开发专家系统专门设计的高级工具，具有很强的支撑环境。知识工程语言可以粗略地分为骨架型和通用型两大类。

骨架型知识工程语言也称为专家系统外壳，它是由一些业已成熟的具体专家系统演变来的。演变的方法是，抽去这些专家系统中的具体知识，保留它们的体系结构和推理机功能，再把领域专用的界面改成通用界面，这样就可以得到相应的专家系统外壳。采用骨架系统可以利用系统已有的知识表示模式、规则语言及推理机制，并可以直接使用已建立的支持该系统的辅助功能，如知识的编码输入及解释、知识库结构及管理机制、推理机结构及控制机制、人机接口及辅助工具、规则之间的一致性检查修改和跟踪调试等，使得新系统的开发变得简单、方便。但是，由于灵活性和通用性较差，骨架型知识工程语言的适用范围受到限制，只适合于与原系统同类型的专家系统的开发，而且技术

上受原系统水平的限制。

通用型知识工程语言即通用型专家系统开发工具，是专门用于构造和调试专家系统的通用程序设计语言。它是完全重新设计的一类专家系统开发工具，不依赖于任何已有的专家系统，也不针对任何具体领域，能够处理不同领域的不同问题。它比骨架系统提供了更多的对数据存取和查找的控制，具有更大的灵活性，又比一般的人工智能程序设计语言更方便使用。常用的通用型知识工程语言有 OPS、UNITS、RLL、ROSS、LOOPS 等。

知识工程语言的专用性和通用性是一对矛盾，如果只考虑专用性，系统就不够灵活，如果只考虑通用性，势必丢掉某些专用的特色，降低工具自身的可用性。因此，专家系统开发工具的发展方向是在不影响专用性的前提下尽量提高通用性。

（三）专家系统的设计工具

1. 辅助型工具

辅助型工具是专家系统开发工具中支撑环境的部分，主要用于帮助建造高质量的知识库和系统调试，包括一些用来帮助获取知识、表达知识的程序，以及帮助知识工程师设计专家系统的程序。按照其功能和特性，专家系统辅助型工具可分为知识获取辅助工具和系统设计助手。前者又包括自动知识获取工具、知识编辑工具、面向问题求解方法的知识获取工具、面向特定问题领域的知识获取工具及基于特定语言的知识获取工具。后者则包括构造专家系统的设计工具，归纳产生规则、决策树和用户提问顺序的归纳工具，以及帮助领域专家建造专家系统的辅助工具。

2. 支持工具

专家系统支持工具也称为专家系统支持环境或支持工具集。它们用来执行与专家系统建造工具的连接，帮助用户与专家系统对话，进行辅助程序的调试或作为它的一部分。专家系统支持工具由辅助调试工具、知识库编辑器、输入/输出界面和解释设施组成。

辅助调试工具提供相应的跟踪辅助功能、自动测试模块机中断设施等；知识库编辑器是一种基于文本编辑的知识编辑工具，它不仅简化了文本知识的输入方式，而且还减少了对知识进行编辑所产生的错误；输入/输出界面提供实时知识获取工具和多种不同的输入/输出方式，使用户能够和运行的系统交流；解释设施是用来向用户解释系统是如何得到某个特定结果的。

（四）专家系统的开发环境

专家系统的开发环境是以一种或多种工具和方法为核心，由若干计算机子程序或者模块组成，为高效率开发专家系统而设计和实现的大型智能计算机软件系统，加上与之配套的各种辅助工具和界面环境的完整集成，形成一种集成化的专家系统开发工具包，用于解决特殊范围或层次的问题。一个好的专家系统开发环境，应向用户提供从系统分析、知识获取、程序设计到系统调试与维护的全方位支持。

专家系统开发环境提供的主要功能有以下几方面。

1）多种知识表示方法。至少提供两种以上的知识表示方法，如语言网络、框架、面向对象等。

2）多种不精确推理模型。一般留有用户自定义接口。

3）多种知识获取手段。除了必需的知识编辑工具外，还有知识自动获取功能和知识求精手段。

4）多样的辅助工具。包括数据库访问、电子表格、作图等工具。

5）多样的用户友好界面。包括多媒体的开发界面和专家系统产品的用户界面，有自然语言接口。

6）广泛的适应性。能满足多种应用领域的特殊要求，具有良好的通用性。

四、草业专家系统的应用

为了能够快捷有效地解决草业科学在研究和生产实践中出现的许多难点与热点问题，利用 ES 的理论设计和开发草业专家系统具有重要的意义。随着计算机技术的飞速发展，草业专家系统不仅能够拥有越来越强大的功能，而且还具有非常广阔的应用前景。

从理论上讲，草业专家系统可以广泛地应用于包括前植物生产层、植物生产层、动物生产层和后生物生产层的草业生产全过程中，为广大的农业科技人员和生产管理人员服务，指导草业生产，推广草业科技成果和技术。前植物生产层包括水源涵养、自然保护、旅游休憩等，植物生产层包括牧草生产、草地管理、饲草调制等，动物生产层包括家畜饲喂、草畜平衡、疾病防治等，后生物生产层包括生产技术的管理、生产方法的管理、草畜产品的储藏和加工等。

从发展趋势上看，草业专家系统与“3S”技术、决策支持系统、生物模拟模型和现代信息技术的结合，将推动草业专家系统向数据动态化、功能集成化、技术综合化、应用网络化发展。

与“3S”技术的结合，不但能够为草业专家系统提供海量基础数据，缓解数据源和知识源缺乏的问题，为系统的基础数据库和模型库提供数据支持；而且这些可更新的动态数据，使数据库、知识库、模型库具有更强大的生命力；同时，“3S”技术的集成使大范围数据的获取成为可能，可以为草业专家系统的功能拓展、知识更新及推广和应用提供重要途径。与决策支持系统的结合，使草业专家系统能针对不同的决策目标，通过定量分析进行辅助决策，给出最优方案，用以指导生产实践。与生物模拟模型的结合，能够把草业专家的最新研究成果融入系统中，使其成为具有整体性反馈控制的专家系统，完成优化和动态定量决策。总体而言，草业专家系统与现代信息技术的结合，能够扩大其使用范围，大大提高系统的实用性。

思　考　题

1. 什么是草业专家系统？它有怎样的特征和结构？

2. 简述草业专家系统的开发过程？

3. 简述在研制草业专家系统时知识获取的基本过程和方式？
4. 在草业专家系统中，主要的知识表达方法有哪些？
5. 如何进行知识库和模型库的构建？
6. 草业专家系统的开发工具有哪些？

参 考 文 献

敖志刚. 2010. 人工智能及专家系统[M]. 北京: 机械工业出版社.
曹卫星. 2005. 农业信息系统[M]. 北京: 中国农业出版社.
李国永, 李维民. 2009. 人工智能及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社.
梁天刚, 陈全功, 任继周. 2002. 甘肃省草业开发专家系统的结构与功能[J]. 草业学报, 11(1): 70-75.
刘铁梅, 谢国生. 2010. 农业系统分析与模拟[M]. 北京: 科学出版社.
王淑英, 梁天刚, 钞振华. 2001. 甘肃苜蓿病害诊断系统的初步研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 37(supp.): 120-126.
王智明, 杨旭, 平海涛. 2006. 知识工程及专家系统[M]. 北京: 化学工业出版社.

第十一章　精准草业与数字草业

本章主要介绍了精准草业的内涵及其形成与发展历程，阐述了我国精准草业的现状及其发展需求；然后概述了全球定位系统的工作原理及其应用领域；最后介绍了我国数字地球发展的对策，论述了数字草业的内涵，界定了数字草业的主要内容和基本构成，分析了我国数字草业的特点，展望了我国数字草业的前景。

第一节　精准草业简介

本节重点介绍了精准草业的内涵，以及我国精准草业萌芽、雏形和形成时期各自的特征，重点分析了我国精准草业的发展现状，指出了我国精准草业发展的主要制约因素，提出了我国精准草业优先发展的重点方向；然后介绍了全球定位系统的组成、定位原理、误差来源、特点、精度及其应用领域；最后介绍了我国智能草业机械装备技术的发展现状。

一、精准草业技术概述

（一）精准草业的内涵

精准草业是草业科学技术持续发展的产物，随着草业生产流程中各个节点的环境压力逐渐增加，需要革新或完善草业生产流程中各个环节的技术体系，实现草业生产的环境友好和资源节约，特别是精准农业的产生和发展，不仅给精准草业的发展提供了丰富的经验和技术储备，而且还推动了精准草业的快速发展。

1. 精准农业

精准农业源自“Precision Agriculture”、“Precision Farming”，我国学者将其翻译为“精准农业”、“精细农业”等不同的版本。虽然不同学者对这个概念的表述不同，但其本质内涵是一致的。一般认为，“精准农业”是利用“3S”技术、决策支持技术和智能装备技术，定量决策、变量投入、精准定位实施农业生产的现代农业生产管理技术系统（赵春江等，2003）。其本质是一方面根据农田内作物生长的土壤性状而调节对作物的投入，另一方面根据农作物生产目标，实施定位“系统诊断、优化配方、技术组装、科学管理”，实施精准变量投入，高效地利用各类农业资源，增加产量，提高农产品质量，减轻农业生产的环境负荷，以最少或最节省投入而实现同等收入或更高收入，充分体现了因地制宜、科学管理的思想，最大限度地挖掘耕地的生产潜力，实现作物生产系统可持续发展的目标（赵春江等，2003）。精准农业的核心技术包括全球卫星定位系统、农田地理信息系统、农田遥感监测系统、农田信息采集系统、作物生产精准管理模型与专

家决策支持系统，基于信息与现代控制技术的农业作业机械智能系统，以及系统集成技术等（刘爱民等，2000）。

精准农业产生的背景是传统农业在生产过程中带来了一系列的生态环境问题，如水土流失、生态环境恶化、生物多样性丧失。传统农业很大程度上依赖于生物遗传育种技术，以及化肥、农药、矿物能源、机械动力等投入，而化学物质过量投入引起生态环境和农产品质量下降，高能耗管理方式降低农业生产效益，加剧资源短缺，传统农业生产管理模式显然已经不能适应农业可持续发展的需求（刘爱民等，2000）。20 世纪 80 年代西方发达国家的作物栽培学家注意到农田内部小区作物产量和环境条件间存在显著的时空差异，从而提出了作物栽培管理中的定位实施，按变量需求投入的作物生产理念，这是精准农业的雏形（Searcy，1996）。此后，随着“3S”技术的兴起，逐渐满足了精准农业的要求。因此，精准农业的核心是建立一个完善的农田地理信息系统，将大尺度的农业生产转变为根据小区需求制订变量投入的方案，精准农业可以说是信息技术与农业生产全面结合的一种新型农业。与传统农业相比，精准农业关注效益，而不是过分强调高产，它将农业带入数字和信息时代，是当今世界现代农业发展的重要方向。

2. 精准草业

草业是农业的重要组分，其生产过程同样面临着生态环境恶化、生物多样性丧失、草畜产品质量下降、水土流失严重的局面（李凌浩等，2012）。因此，在草业生产过程中，也需要定位实施、按变量需求投入的策略，以增加草畜产品产量，提高草畜产品质量，减轻草地生产的环境负荷。

随着现代信息技术在草业实践中的应用，将传统草业生产转变为定位实施，按变量需求投入的精准草业生产时代已经到来，某种意义上说精准草业是精准农业技术与草业科学相互融合的结果。一般而言，精准草业是采用信息技术和草业生产相关的基础学科有机结合的手段，实时监测草地、牧草和草坪草生产过程，利用诊断和决策制订计划，集成多种信息技术的现代草地、牧草和草坪草信息化生产系统，其信息技术主要包括遥感技术、地理信息系统、全球定位系统、计算机、通信和网络、自动化技术等高新技术（李凌浩等，2012）。草业生产相关的基础科学包括地理学、草学、农业、生态学、植物生理学、土壤学等学科。生产过程包括牧草和草坪草、草地和草坪及土壤的宏观与微观实时监测，以及牧草生长和发育、病虫害、水肥状况，相应环境状况信息的定期获取和动态分析（李凌浩等，2012）。通过 GPS 确定草业作业者的瞬时位置，通过设置不同位置用途各异的传感器及监测系统，随时随地地采集田间数据（土质、性状、含水率、肥力、毒杂草量、病虫鼠害和分布状况等），将这些数据输入 GIS；结合事先储存在 GIS 中定期输入的或持久性的数据、专家系统及其他决策支持系统，对信息进行加工处理，瞬间做出适当的草业作业决策。

（二）精准草业的形成与发展

我国草地面积约 4 亿 hm^2，占世界草地面积的 12.5%，占国土面积的 41.7%，是保

障食物安全和改善膳食结构的重要物质资料，也是维持国家生态安全的主要屏障，更是国土安全和边疆稳定的主要阵地（周旭英，2008）。因此合适的草地生产管理方式在一定程度上决定着我国的食物、生态和国土安全。然而草地生产管理方式作为一种生产关系，只有适合生产力发展水平时才会推动草地畜牧业的持续发展，当其不适合生产力发展水平时，就会阻滞草地畜牧业和社区的可持续发展。然而牧区生产力的活跃性和草地生产管理方式的相对稳定性间的关系，客观上决定了人们需要不断调整草地生产管理方式去适应牧区生产力的发展（赵旭等，2013）。从精准草业形成和发展的角度出发，我国精准草业的发展大致经历了萌芽时期、雏形时期和形成时期。

1. 精准草业的萌芽

自 20 世纪 80 年代，我国草地生产管理方式从游牧利用方式转向了家庭承包经营方式，将原来大尺度或以村社为单位的草地生产管理方式转为以家庭为单位的管理方式。与原来草地游牧利用方式相比较，具有缩小劳动范围，固定劳动时间，牧户和草地间形成相对稳定的依附关系的特征，这不仅适应了牧区生产力发展，契合了牧民的愿望，将草地生产管理决策权从集体决策转向牧户个人，理顺了人、草、畜间的关系，而且还根除了草原无偿使用的观念，改变了重畜轻草、重用轻管的经营习惯，刺激了牧民的生产积极性，增强了牧民依法保护、合理利用草原的责任感。由于牧户作为承包草地的实际经营者和管理者，其有权决定自己草地利用的时空尺度，客观上牧户可以根据自己的生产实践需要，安排投入和产出，这是精准草业的萌芽。

2. 精准草业的雏形

经过 20 多年的发展，草地家庭承包责任制中牧户的主要关注点为增加经济收益，客观上促进了家畜数量的增加，其弊端逐渐体现。水源区成为草地退化的源点；牧户个体决策的差异性不利于畜牧产品的规模化，规模效益不显著；牧户更多关注经济收益，对生态效益的关注度较低；重要的是忽略了土-草-畜-人之间的关系（杨理和侯向阳，2007），此时需要建立理顺这种关系的草地生产管理方式。家庭牧场应运而生，家庭牧场以单户或联户家庭牧场为载体，将饲草生产、健康养畜、畜产品加工和管理方案等草原生产流程的各个环节以标准化形式固定，草地畜牧业生产遵循统一的技术规范和规程，从而形成一个比较完善的、系统的草地畜牧业生产标准体系，其基本特征是规模适度、草地生产力持续稳定，畜群结构合理，饲养和管理科学（文成志，1998）。

家庭牧场作为一个系统，各个生产环节作为子系统，不仅注重各个子系统的运行，而且还注重子系统间的衔接，通过子系统间的耦合增加总系统的效益，注重生产和生态效益，而不仅仅是产出，关注副产品和废物的再次利用，让家庭牧场内部形成小循环模式，减轻草地生产的环境负荷（文成志，1998）。从家庭承包责任制到家庭牧场，大部分牧户虽然依然经营自己的草地，但其生产和管理的理念发生了明显变化，草地生产管理的核心从高产转移至效益，注意副产物和废物的利用，减轻环境负荷，从草畜系统转向土-草-畜-人系统，这是精准草业的雏形。

3. 精准草业的形成

家庭牧场经营模式虽然实现了草地生产管理方式按牧户需求管理，但客观上是小农经济，区域内无法提供大量的同样产品，规模化效益无法体现，主要是不同牧户间草地基况存在差异和适宜饲养的家畜或动物种类可能不同。现代信息技术的发展，特别是“3S”技术在草业生产实践中的应用，客观上可以将广袤的草原按照其土壤特性和草地类型，分化为不同尺度的区域，将草地按照生产特征进行分区，一个区域内草地生产管理方式采用相对一致的标准，生产同样的草畜产品，建立专业合作社，从而实现规模效益。在一个较大的区域内，根据土壤特征、家畜需求、天然草地营养供给能力，可以通过人为定向设计，改造原有草地生产系统，提高草地生产的效益。例如，中国科学院植物所在内蒙古多伦县生态地区，将土壤特性肥沃的天然草地改种青贮玉米、苜蓿、冰草等多种优质牧草，弥补天然草地营养供给不足的问题，种植 $1hm^2$ 栽培草地相当于 $10hm^2$ 天然草地的生产力，既满足了家畜的日常需求，又让更多的天然草地以自然方式恢复其生态功能（李凌浩等，2012）。

将精准农业的发展思路引入到草地管理的实践中，逐渐形成精准草业。其本质就是在满足牧草生长的生态因子前提下，实现定位实施，按需变量投入，并根据草地次级生产的需求，人工定向优化家畜或动物生产的饲料构成，提高区域草地生产效益的同时，减少对天然草地的过度利用，保护草地生态环境。我国牧区先后启动了天然草原保护、退牧还草等重大生态工程，通过“3S”技术获取准确的草地实况信息，将草地按照其功能重要性划分为不同属性的管理区域，从而定位实施管理策略，实现草地畜牧业生产的科学管理和动态调控（郭正刚等，2004），在局部地区以集约经营、科学管理等为特征的牧场形式进行管理（Cui et al.，2012），初步形成以生产经营价值较高（如高尔夫球场、种畜场、草籽生产基地等）的精准草业管理模式（唐华俊等，2009）。

（三）我国精准草业的需求分析

我国精准草业在经历萌芽、雏形和形成三个阶段后，已经初具规模，但依然存在诸多因素，限制其持续健康发展，主要原因是国家和社会对不同时期精准草业的要求有所不同，特别是目前随着社会对草业技术和草业生产需求的精细化，不同地区精准草业发展应该具有不同的重点领域和方向。

1. 精准草业发展的制约因素

中国地域辽阔，不同地区自然、经济、社会条件和生产力发展水平差异较大，草业生产流程和特征各具特色。不同区域精准草业模式受当地社会经济发展状况、区域特点和发展程度的制约。因此，要采用信息技术改造传统的草业，促进草业的现代化与信息化尚需要不断探索和发展。我国发展精准草业技术的背景条件与美国、欧洲国家不同，主要是国情复杂，人口密度大，贫富差距大，因此我国发展精准草业要比西方国家难度大。限制我国精准草业发展的核心因素主要包括下列几个方面：首先，中国草地类型多样，分布于差异较大的环境，遍及热带、亚热带、温带和高寒等不同的气候类型，主体

分布区既包括了相对平坦的内蒙古高原和东北地区，又包括沟壑纵横的黄土高原、云贵高原和秦巴山地，还包括高海拔的青藏高原、天山、阿尔金山等地区。因此，建立统一的精准草业模式难度较大。其次，我国草地主要分布在少数民族居住区和边疆地区，基础条件相对薄弱，草地管理者接受教育的程度相对较低，一方面采用自动控制的机械化装备从事草地生产困难重重，另一方面，掌握先进机械操作和先进技术的速度较慢。最后，我国牧区草地生产方式目前多为家庭牧场，仍然存在大面积草原条块分割，牧区社会经济发展较为落后，许多高新技术很难在短期内被大范围采用，家庭牧场仍然以传统的生产管理方式为主。因此，中国精准草业发展需要充分考虑我国实际国情，因地制宜地引进高新技术，走有中国特色的精准草业之路。

2. 精准草业发展的重点方向

我国传统草业主要集中于内蒙古、新疆、青海、甘肃、西藏等几个重点牧区，随着现代养殖业和草产业的发展，传统农区也成为我国草业发展的重要地区，即我国草业发展从原来的牧区转向现在的牧区和农区两个阵地，这注定了我国精准草业的发展要分为农区和牧区两个阵地考虑，有些重点方向既适合于农区，又适合于牧区，有些则要么仅适合农区，要么仅适合牧区。

第一，采用精准灌溉技术，提高栽培草地的水分利用效率。水资源短缺是农区草业乃至农业持续发展的主要限制因素，尤其是随着我国栽培草地面积逐渐增加，其与作物灌溉竞争水资源的趋势更加激烈，因此栽培草地精准灌溉需要正确处理以下几个关系：①选择适宜的灌溉方式，促进水资源的高效利用，如交替灌溉较常规灌溉能够提高河西走廊紫花苜蓿水分利用效率的 48%以上（表 11-1），但紫花苜蓿第一茬和第二茬产量变化不大（表 11-2）；②选择适宜的草种和品种，特别是干旱半干旱地区，选择抗旱性较强的品种能够增加产量和提高单位体积水分的生产力；③正确处理开源与节流的关系，精准草业的核心是效益，而不是高产，以最少的灌溉量获取最大的经济效益，特别是地

表 11-1　灌溉方式与灌溉量对紫花苜蓿水分利用效率的影响（引自 Yu et al.，2015）

灌溉量	灌溉方式	基于总生物量的水分利用效率	基于地上生物量的水分利用效率
I_1	交替灌溉	5.76±0.3485a	4.29±0.1191a
	常规灌溉	3.41±0.1951cd	2.62±0.1706d
I_2	交替灌溉	5.73±0.1732a	4.33±0.1388a
	常规灌溉	3.10±0.0728d	2.53±0.0385d
I_3	交替灌溉	4.83±0.1616b	3.81±0.1239b
	常规灌溉	2.82±0.1529de	2.38±0.1260d
I_4	交替灌溉	3.80±0.2295c	3.01±0.1284c
	常规灌溉	2.28±0.0917e	1.93±0.0719e
显著性			
灌溉方式		**	**
灌溉量		**	**
灌溉方式 × 灌溉量		*	*

*表示 0.05 水平上影响显著，**表示 0.01 水平上影响显著。I_1~I_4 分别表示 70%、85%、100%、115%的蒸散发

下水资源的开采，要合理调控利用，适度开发；④“巧用天水”是西部干旱半干旱地区精准灌溉的精髓，利用饲草生长周期长、与降雨同步的特性，提高水资源利用效率；⑤以水价经济杠杆，推动精准灌溉草业的发展。因此，农区栽培草地灌溉，提高水资源利用效率是灌溉的核心和准绳。

表 11-2　灌溉方式与灌溉量对紫花苜蓿产量的影响（引自 Yu et al.，2015）

处理	产量/（kg/hm²）			
	第一茬	第二茬	第三茬	生长季
灌溉方式				
交替灌溉	5408.33	4550.00	2400.00b	12358.33b
常规灌溉	5766.67	4750.00	4700.00a	15216.67a
显著性	ns	ns	**	**
灌溉量				
I_1	4600.00b	4033.33c	3000.00b	11633.33b
I_2	5800.00a	4500.00b	3200.00b	14100.00a
I_3	6350.00a	5366.67a	4133.33a	15250.00a
I_4	5600.00a	4700.00b	3866.67a	14166.67a
显著性	*	*	**	**
灌溉方式 × 灌溉量				
显著性	ns	ns	ns	ns

*表示 0.05 水平上影响显著，**表示 0.01 水平上影响显著，ns 表示无显著性差异。I_1~I_4 分别表示 70%、85%、100%、115%的蒸散发

第二，实施精准施肥，提高肥料利用率。对农区草业而言，增添土壤养分是维持栽培草地生产力的重要途径，但我国年化肥施用量从 1978 年至 2011 年增长了 581%，而粮食总产量仅增长 87.43%，当前我国化肥施用量占世界的 35%，相当于美国和印度的总和。1kg 化肥投入所生产的粮食由 31.5kg 下降至 17.7kg，说明我国化肥施用结构不合理，且利用率低，主要问题是没有精准定位实施，有些地方过度使用化肥，已经引起了严重的水土污染，而有些地方土壤始终处于贫瘠状态。因此，在农区栽培草地精准施肥过程中，需要根据土壤养分特性，精准定位实施，按需变量投入，一方面提高化肥资源利用率，另外一方面降低成本和提高牧草产量。

第三，建立天然草地信息化管理档案。我国天然草原一直处于养分输入和输出相悖的状态，主要是我国大部分牧区将家畜粪便作为能源使用，割裂了土-草-畜养分循环系统。因此不同地区土壤肥力现状及其养分源差异较大，这就需要依托现有技术和资料，建立基于“3S”技术的草地土壤养分管理和以施肥为主体的信息系统；针对家庭联产承包草地分散经营的体制，在主要牧区选点，研究不同草原利用条件下土壤养分状况、变化规律和变异情况，建立基于不同草原利用状态下的土壤养分库和信息系统，对我国草地土壤各养分状况及变化特征进行图形化描述和信息化管理。在此基础上，以县或乡为单位，研究建立适合区域特征的土壤养分信息系统和养分信息化动态管理模式，分类分

区为牧民提供物质投入（主要是肥料）的选择方案。

第四，树立效益优先的草地生产理念。草原生产管理的核心从产出向效益转变，增加自动控制和信息化的设施家畜养殖，增加草畜产品产出，提高其品质，节约水、肥资源。

第五，开展鼠虫害的研究，研发生物源灭鼠和灭虫农药，积累了不同鼠类和害虫的防治经验，为全面实施精准草业提供科学依据。

第六，开发精准草业的“大脑”，加强我国草业管理决策支持系统建设，其核心是基于空间变量而制作涉及田间生产和管理的处方。

二、草业空间定位系统

草业定位系统又称全球导航卫星系统，主要有美国的全球定位系统（Global Positioning System，GPS）、俄罗斯的 GLONAS、欧盟的 Galieo 和中国北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）。基于我国草业发展现状和定位系统应用的范围，重点介绍全球定位系统和北斗卫星导航系统。

（一）GPS

GPS 是利用人造地球卫星进行点位测量导航的一种技术体系，可覆盖地球表面 98%的地区。GPS 始于 1958 年美国军方研发的一个项目，主要任务是为美国陆海空三大领域提供实时、全天候和全球性的导航服务，以及情报搜集、核爆监测和应急通信等一些军事目的，后来逐渐应用于民用领域。其主要功能是利用导航卫星和地面站，为全球提供全天候、高精度、连续、实时的三维坐标和定位信息（栗恒义，1996；胡友健等，2003）。

1. GPS 组成

GPS 由三大部分组成，分别是空间部分——GPS 卫星星座、地面控制部分——地面监控系统、用户设备部分——GPS 信号接收机（图 11-1）。GPS 卫星星座，GPS 由 21 颗工作卫星和三颗备用卫星组成，它们均匀分布在 6 个相互夹角为 60°的轨道平面内，即每个轨道上有四颗卫星。卫星高度离地面约 20 000km，绕地球运行一周的时间是 12 恒星时，即一天绕地球两周。GPS 卫星用 L 波段两种频率的无线电波（1575.42MHz 和 1227.6MHz）向用户发射导航定位信号，同时接收地面发送的导航电文及调度命令。地面控制系统，对于导航定位而言，GPS 卫星是一动态已知点，而卫星位置是依据卫星发射的星历（描述卫星运动及其轨道的参数）计算得到的。每颗 GPS 卫星播发的星历是由地面监控系统提供的，同时卫星设备的工作监测及卫星轨道的控制，都由地面控制系统完成。GPS 卫星的地面控制站系统包括位于美国科罗拉多的主控站及分布全球的三个注入站和五个监测站，实现对 GPS 卫星运行的监控。GPS 信号接收机，任务是捕获 GPS 卫星发射的信号，并进行处理，根据信号到达接收机的时间，确定接收机到卫星的距离。如果计算出四颗或者更多卫星到接收机的距离，再参照卫星的位置，就可以确定出接收机在三维空间中的位置。

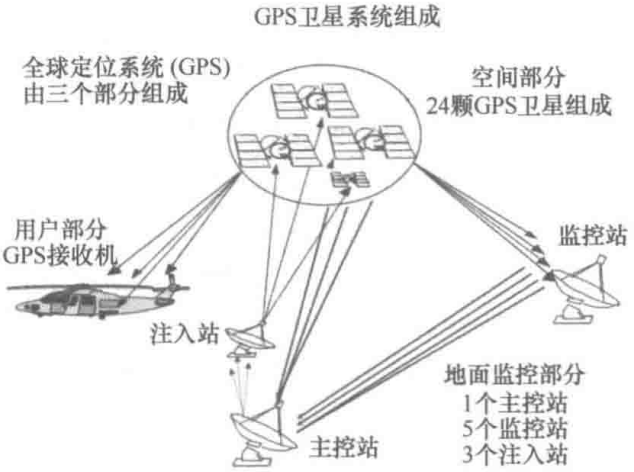


图 11-1　GPS 卫星系统组成（引自亚洲流体网，2013）

2. GPS 定位基本原理

GPS 定位基本原理是利用测距交会确定点位（胡友健等，2003）。一颗卫星信号传播到接收机的时间只能决定该卫星到接收机的距离，但不能确定接收机相对于卫星的方向。在三维空间中，GPS 接收机的可能位置构成一个球面。当测到两颗卫星的距离时，接收机的可能位置被确定于两个球面相交构成的圆上；当得到第三颗卫星的距离后，球面与圆相交得到两个可能的点；第四颗卫星用于确定接收机的准确位置。因此，采用 GPS 定位时，地面接收机最少要接收四颗以上卫星的信号。当接收到信号的卫星数目多于四个时，系统则会择优选择四颗卫星计算位置。

3. GPS 误差来源及其特征

GPS 定位误差形成的因素很多，大致可以归为与卫星有关的因素，与传播途径有关的因素，与接收机有关的因素，以及其他（王晓华和郭敏，2005）。卫星自身方面，首先是美国政府实施了可用性选择政策（SA 政策，Selective Availability），即通过在 GPS 基准信号中加入了高频抖动技术，人为降低了普通用户采用 GPS 导航定位时的精度，但该政策 2000 年被取消；其次是卫星星历误差所致，GPS 定位计算某时刻卫星位置时所需要的卫星轨道参数是通过各种类型星历提供的，但任何类型星历，其计算出的卫星位置与其真实位置均有差异；再次是卫星钟差，指卫星上所装置的原子钟的钟面时与 GPS 标准时间之间的误差；最后是卫星信号发射天线相位中心偏差，指 GPS 卫星上信号发射天线的标称相位中心与其真实相位中心之间的差异。传播途径方面，首先是电离层延迟；其次是对流层延迟；最后是多路径效应，指接收机周围环境的影响，使接收机所接收到的卫星信号中还包括各种反射和折射信号的影响，称为多路径效应。与接收机方面，首先是接收机钟差，指 GPS 接收机所使用钟的钟面时与 GPS 标准时之间的差异；其次是接收机天线相位中心的偏差，指接收机天线相位中心相对测站标石中心位置的误差。其他方面，首先是 GPS 控制部分人为或计算机造成的影响，指 GPS 控制部分的问题或用户在进行数据处理时引入的误差等；其次是数据处理软件的影响，指数据处理软件的算法不完善，从而形成对定

位结果的影响。

尽管 GPS 具有不可避免的误差来源，但其特点十分突出：第一，具有全球地面连续覆盖的特点，即地球上任何地点、均可连续同步观测到 4 颗卫星，保障了全球、全天候、连续的对地物经纬度和高度的定位；第二，具有定位精度高、观测时间短的特点，一般民用单点的定位精度大约为几十米，但数据经过处理后，GPS 定位精度可精确至厘米级，而动态相对定位的时间仅需几分钟就能得到观测结果；第三，具有全天候作业的特点，GPS 观测可以在任何地点、任何时间连续进行，不受天气状况影响；第四，操作简便，GPS 测量自动化程度高，用户操作简单易学；第五，GPS 接收机体积小、质量轻、便于搬运和携带；第六，应用广泛，它主要应用于导航和测量方面。随着 GPS 定位技术的发展，其应用领域仍在不断拓展（王晓华和郭敏，2005）。

4. GPS 基本应用

GPS 用途从过去单一的军事用途，目前扩展到各行各业。目前主要用于以下几个方面：第一是应用于测量，GPS 技术广泛应用于测绘和勘测界领域。利用载波相位差分技术（RTK），在实时处理两个观测站的载波相位的基础上，可使测量精度达到厘米级。与传统的手工测量手段相比，GPS 技术有着巨大的优势，表现为测量精度高，操作简便，仪器体积小、便于携带，全天候操作，观测点之间无须通视，测量信息自动接收，以统一的标准存储。目前广泛应用于大地测量、资源勘查、地壳运动、地籍测量等领域。第二是应用于交通服务，利用 GPS 技术跟踪和调度出租车、租车服务、物流配送等行业，合理配置和分布车辆，从而以最快速度响应用户乘车或送货的请求，不仅降低了能源消耗，而且还节省运行成本。GPS 应用于车辆导航，特别是城市数字化交通电台，可以通过 GPS 实时发播城市交通信息，且通过车载 GPS 进行精确定位，结合电子地图及实时交通状况，其为驾车者自动匹配选择最优路径，及时提醒驾车者路线是否正确。民航运输业内，GPS 接收设备不仅有助于飞机驾驶员着陆时准确对准跑道，还能为塔台工作人员安排进出口航班提供帮助，提高机场利用率。第三是应用于救援，利用 GPS 可以及时准确定位火警报警点、救护地点、交通事故点，从而为警察应急调遣，及时处置火灾、犯罪现场、交通事故和交通堵塞等紧急事件。有了 GPS 的帮助，救援抢险人员能够在人迹罕至的大海、山野、沙漠等条件恶劣的环境中，有效搜索和拯救失踪人员和遇险船只等。第四是应用于农业，GPS 技术已经被广泛引入农业生产领域。例如，获取农田、草地、森林的信息，定位标记试验田和样地，采用植被指数和遥感影像间的关系，估测作物、草地和森林的生物量，定位土样采集点的位置。通过计算机系统处理和分析数据，决策出农田、草地和森林地块的管理措施，实现定位实施各种农艺措施，按变量变化确定投入物质的量，实现不减产情况下，降低农业生产成本，提高资源利用效率，减少浪费和农业生产环境的负荷。第五是应用于娱乐消遣，随着 GPS 价格的降低，小型 GPS 接收机逐渐走进了人们的日常生活，成为外出旅游和探险的好帮手。人们可以在高楼林立的陌生城市内，通过 GPS 迅速定位目的地，以最优路径行驶。野营者携带 GPS 接收机，可快捷地找到合适的野营地点（胡友健等，2003）。

（二）BDS

也称北斗二号，是我国自主研制的全球卫星定位系统。该系统主要包括空间段、地面段和用户段三个组分，能够在全球范围内实现全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务，且具有短报文通信能力。2012 年 12 月 27 日开始，在区域范围内导航和定位的精度达 10m，测速精度 0.2m/s，授时精度为 10ns（搜狗百科，2013）。2012 年 12 月 27 日开始 BDS 正式向亚太地区提供无源定位、导航和授时服务。

1. 系统构成

空间段：由 35 颗卫星组成，其中 5 颗是静止轨道卫星，27 颗为中地球轨道卫星，3 颗为倾斜同步轨道卫星。5 颗静止轨道卫星的定点位置为东经 58.75°、80°、110.5°、140°、160°，中地球轨道卫星运行在 3 个轨道面上，轨道面之间为相隔 120°均匀分布。地面段：由主控站、注入站、监测站组成，其中主控站用于系统运行管理与控制等，处理从监测站接收的数据，生成卫星导航电文和差分完好性信息，然后交由注入站执行信息的发送；注入站用于向卫星发送信号，对卫星进行控制管理，在接受主控站的调度后，将卫星导航电文和差分完好性信息向卫星发送；监测站用于接收卫星的信号，并发送给主控站，可实现对卫星的监测，以确定卫星轨道，并为时间同步提供观测资料。用户段：即用户的终端，可以是专用于北斗卫星导航系统的信号接收机，也可以是同时兼容其他卫星导航系统的接收机。接收机需要捕获并跟踪卫星的信号，根据数据按一定的方式进行定位计算，最终得到用户的经纬度、高度、速度、时间等信息（搜狗百科，2015）。

2. 特征与优势

BDS 定位系统具有四大特征：第一，其定位快速、全天候、实时；第二，定位精度与 GPS 相当；第三，具有短报文通信功能，一次可传送 120 多个汉字的信息；第四，精密授时精度达 20ns。BDS 定位系统基于上述特征，其应用时具有五大优势：第一，BDS 同时具备定位与通信功能，且通信时不需要其他通信系统支持，但 GPS 只能定位，不能通信；第二，BDS 覆盖范围大，没有通信盲区，不仅可为中国提供服务，而且还可为周边国家或地区提供服务；第三，BDS 适合于大范围监控管理和数据采集用户的数据传输；第四，融合北斗导航定位系统和卫星增强系统两大资源，即可利用 GPS，但较 GPS 应用更加广泛；第五，BDS 自主系统，安全、可靠、稳定，保密性强，适合关键部门应用（搜狗百科，2015）。

3. 北斗导航系统的应用

根据用户应用环境及 BDS 的功能，BDS 用户机分为五类：第一类是基本型，其主要用于一般车辆、船舶和便携型用户的导航定位；第二类是通信型，其主要用于野外作业、水文测报、环境监测等各类数据采集和数据传输；第三类是授时型，其主要用于授时和校时，实现用户间的时间同步；第四类是指挥型用户机，其主要用于小型指挥中心的指挥调度、监控管理；第五类是多模型用户机，既能接收 BDS 定位和通信信息，又能利用 GPS 系统或 GPS 增强系统导航定位（周露和刘宝忠，2004）。

三、智能化草业机械装备技术

随着现代科学技术的发展，现代草业生产的机械智能化程度越来越高，这不仅在草业生产中节省了大量的人力、物力和财力，而且还提高了草业生产的效率。目前我国智能化草业机械装备种类较多，品种齐全。主要有自走型草业机械智能化技术、草地信息采集装备及系统、草地遥感监测装备及系统、草地地理信息装备及系统、草业专家系统、环境监测系统网络化管理系统和培训系统、农用航空技术（唐华俊等，2009）。支持“精准草业”的智能化草业机械主要包括带产量监视器与产量图自动生成系统的收获机械，实现精密播种、精细施肥、精细施药和精细灌溉等定位控制作业的具有变量处方的草业机械，以及实施机载草地空间信息快速采集的其他机电一体化草业机械等。

“精准草业”应用实践可根据不同国家和地区的社会、经济条件，围绕提高生产、节本增效和保护环境的目标，采用不同的技术组装方式，逐步提高草业生产管理的科学化与精细化水平。建立一个完整的精准草业技术体系，需要有多种技术知识和先进技术装备的集成支持。具体包括以下几方面内容。

第一，GPS、GIS 在草业机械田间导航、作业面积计量、引导定位作业和空间数据定位采样中的应用及软件开发研究。

第二，用于与机械配套的产量传感技术与带产量图自动生成系统软件的开发研究。

第三，实施定位处方控制的施肥、施药、浇水、精播和栽植的移动作业机械的研究。

第四，自走式土壤、病虫草害和作物苗情定位信息采集机械装备的开发研究。

第五，大中型拖拉机和自走型草业机械智能化技术状态实时诊断、监控与显示装置的开发研究。

第六，农机作业信息高效处理、存储、传输、通信技术及其总线与接口的标准化。

第七，GPS、GIS 有关技术国产化、产业化和用于支持农业机械社会化服务的规划、组织、调度与辅助管理决策支持系统的研究。

第八，研究试验带 GPS 接收机的智能化节水灌溉机械、植保机械和播种机械，尽快形成国产化的自主产品，为农机社会化服务体系提供新一代技术装备。

第二节　数字草业技术

本节介绍了数字地球的概念、技术基础和作用，分析了我国数字地球发展的战略对策和技术对策；介绍了数字草业的内涵，界定了我国数字草业的主要内容，提出了我国数字草业发展的基本构成和我国数字草业发展的自身特点，并对我国数字草业研究和发展的前景作了展望。

一、数字地球概述

（一）数字地球概念

数字地球（the Digital Earth，DE），又称虚拟地球，出现于 20 世纪末期，1998 年 1

月 31 日，美国副总统戈尔在加利福尼亚科学中心作了题为《数字地球——认识二十一世纪我们这个星球》的讲演，这是数字地球作为一个单独名词首次在公开场所被提及。数字地球是以计算机技术、多媒体技术和大规模存储技术为基础，以宽带网络为纽带，运用海量地球信息对地球进行多分辨率、多尺度、多时空和多种类的三维描述（史明昌和王维瑞，2011），并利用它作为工具来支持和改善人类活动与生活质量，用数字化的方法将地球、地球上的活动及整个地球环境的时空变化装入电脑中，实现网上流通，并使之最大限度地为人类的生存、可持续发展和日常的工作、学习、生活、娱乐服务；其核心是用数字化的手段来处理整个地球的自然和社会活动诸方面的问题，最大限度地利用资源，并使普通百姓能够通过一定方式方便地获得他们想了解的有关地球的信息（承继成等，2000）。数字地球的两大特点是嵌入海量地理数据，以及实现对地球的多分辨率和三维描述。

数字地球的产生不仅与认知科学、信息科学和地球科学的发展密切相关，而且还与遥感、GPS、因特网、海量存储和元数据等技术的发展密切相关（图 11-2）。认知科学、信息科学和地球科学为数字地球的产生奠定了理论基础，遥感、GPS、因特网、海量存储和元数据等技术的发展为数字地球提供了技术支持。全球变化和可持续发展对数字地球的出现起到了助推剂的作用。目前数字地球已经被广泛应用于不同专业领域、城市与区域发展、科研和教育事业、政治和外交等国际事务的处理。

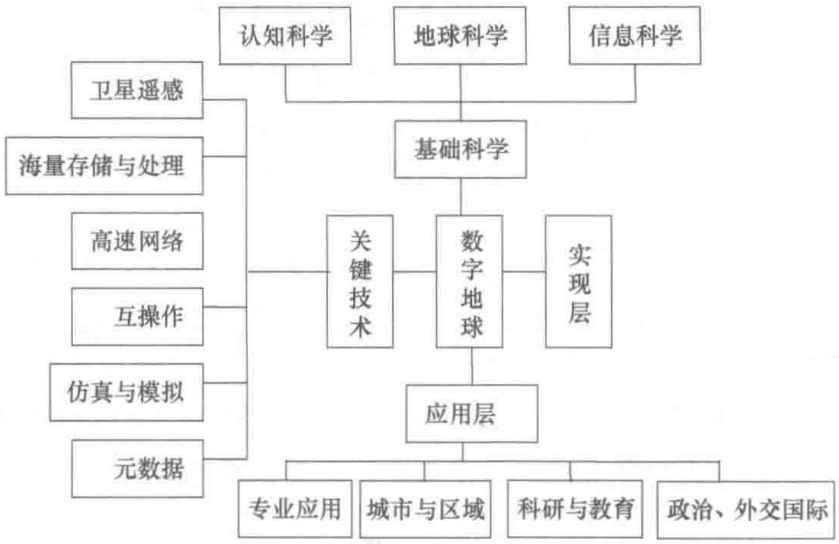


图 11-2　数字地球（仿承继成等，2000）

（二）数字地球技术基础

数字地球的研究对象是地球，采用以网络和计算机信息处理为主体的技术系统，各个国家或地区建成国家信息基础设施（National Information Infrastructure，NII），又称信息高速公路，各个国家和地区通过因特网相连接则成为地球信息高速公路。数字地球主要由四个部分组成，分别为数据交互网络体系、基础数据集、法规与标准、机构体系。数字地球主要由计算机服务器、数据库、网络和计算机终端组成，它能够给用户随时提供大容量信息。其技术系统的基本框架由遥感、遥测、地理信息系统、因特网等组成，其中遥感、遥测等提供获取数据的手段，地理信息系统管理、存储、分析和表现数据，

因特网实现数据传输发布。

1. 数据自动获取

自动和快速地实时处理、准确地提取信息是数字地球信息获取的关键，这些信息均可从高分辨率卫星遥感数据中自动快速获取。高分辨率卫星遥感数据的分辨率从 1m 到 4000m，且每天均产生大量数据，因此自动快速获取这些数据是建立数字地球的基础。

2. 地球空间数据的存储和处理

分布式数据存储是海量数据管理的趋势，可以避免集中式系统带来的管理困难及网络拥塞，因此地球空间数据的存储和处理通常采用超大型计算机或者并行计算以实现数据的快速处理。

3. 超媒体空间信息系统

数字地球的主要任务之一是通过因特网实现信息的共享和发布，主要通过 WebGIS 技术实现，即超媒体空间信息系统。

4. 地理信息的分布式计算

空间分布特性是地理信息的基本特征之一，地理信息具有基础性、共享性和综合性的属性。因此，在 OpenGIS 规范的约束下，采用 CORBA（或 COM）体系结构，就可以实现地理信息的分布计算。

5. 无比例尺数据库

无比例尺数据库是指以一个大比例尺数据库为基础数据源，在特定区域内的空间对象信息量会随比例尺变化自动地增减，实现大比例尺空间数据自动生成不同小比例尺的数据，而小比例尺则根据用户需求而定。

6. 空间数据仓库

空间数据仓库的主要任务是将来源、结构、格式不同的原始数据，采用相对一致的标准进行处理、储存、分析，然后建立结构化查询的数据库，其目的是及时处理积累的海量空间数据，从中抽取有用信息，以提供用户决策支持。结构框架包括数据源、Metadata 数据源、Metadata 互操作协议、数据抽取求精、Metadata 创建与浏览数据仓库、存取与检索、Metadata 管理及查询与分析等。

7. 空间数据融合

空间数据融合指将多种数据合成后，不再保存原来数据而产生一种新的综合数据，如假彩色合成影像等。数字地球的多种数据融合不仅包括多种分辨率数据、多维数据、不同类型数据的融合，而且还要实现融合得到的数据的可视化表现。

8. 虚拟现实技术

虚拟现实指运用计算机技术生成一个可交互、动态的“世界”，其具有逼真、视

觉化、听觉化、触觉化的效果。人们可以通过操纵和考察虚拟世界中的虚拟实体，用户与虚拟现实系统的交互利用数据手套、数据头盔、数据衣等进行，而 VR 系统通过视觉描绘器、听觉描绘器、触觉描绘器使用户产生身临其境的感觉。目前，GIS、虚拟现实及 Web 技术相结合的方式之一是虚拟现实造型语言（Virtual Reality Modeling Language，VRML），通过 VRML 描述 GIS 信息，可以在因特网上发布空间三维数据，供用户浏览。

9. 元数据

为了保证信息不被误用，需要通过 Metadata 对数据进行详细的描述，这样不仅数据生产者能够充分描述数据集，用户还可以估计数据集对其应用目的的适用性。

（三）数字地球的作用

数字地球是世界进入信息时代的最重要标志之一，其对推动全球信息产业的发展具有非常重要的作用。

第一，利用数字地球可以多分辨率、多尺度、多时空和多种类描述全球变化的过程、规律和影响，进而通过三维描述和各种模拟及仿真的手段解析全球变化过程，以及人类应付全球变化的对策。

第二，通过数字地球可以了解到全球范围内任何地方生态环境、地震、土地利用现状、灾害、犯罪、外交、国防的最新、最全面的实际情况，从而为政府在生态环境保护、地震救援、灾害防治、土地利用规划、打击犯罪活动，以及外交和国防等方面进行宏观决策提供依据。

第三，依托数字地球，农牧民可以获得其农田、草地和森林的长势等信息，通过利用 GIS 等技术进行分析，制定出精准农业和精准草业的行动计划，然后借助车载 GPS 和电子地图，定位实施精准农业和精准草业作业。

第四，在水利建设方面，通过数字地球可以虚拟大型水库建成后库区周围和上下游的环境变化，一方面对水库修建提供决策依据，另一方面对水库修建后可能出现的问题有比较清楚的了解，从而制定相应对策。

第五，在现代化战争和国防建设方面，可以利用数字地球建立服务于战略、战术和战役的各种军事地理信息系统，运用虚拟技术建立数字化战场，掌握战场主动权。

第六，数字地球可为普通用户提供学习、购物、参观、旅游服务，充分利用其时空变化，用户可以穿越时空或空间范围，领略不同地区的风土人情、文学艺术、自然景观、植物、动物、天气等。依托数字地球，用户可以通过戴上头盔看见地球从太空中出现，且随分辨率增大，用户可以看见大陆，然后是乡村、城市，最后是私人住房、商店、树木和其他天然及人造景观。

数字地球将改变人类的生存和发展方式，未来利益分配将无不与数字地球息息相关，尤其是在未来利益冲突（包括军事冲突）中将很大程度依赖对数字地球的控制，数字地球上占优势的一方将在数字地球上展开外交攻势、新闻传播、心理战、政治颠覆、文化侵略和数据破坏等。

（四）我国数字地球的发展对策

我国实施“科教兴国”和“可持续发展战略”，强调自主创新能力。在中国发展“数字地球”具有一定的迫切性，因此我国从国家战略层面和技术层面提出了中国数字地球发展的对策，以避免将“中国数字地球”发展为“数字中国”。中国数字地球是以整个地球为背景，以整个地球的技术系统作为研究对象，其中整个地球指地球的任何一个部位的、感兴趣的重点地区，实际上并不是全球。数字中国指以中国的数字化或中国的信息化为研究对象，即以解决中国自己与社会经济发展密切相关的数字地球问题作为研究的重点，或以数字地球的方法，解决中国最迫切的问题，如数字长江、数字农业等（孙小礼，2000；华璀和吴健平，2001）。

1. 战略层面发展对策

首先，“中国数字地球”应国家战略措施，以整合地球科学，促进先进科学技术发展，最终形成以科技发展为基础的新产业，从而引导我国地球科学、信息科学，以及相应产业的发展。其次，“中国数字地球”框架内加强地理信息基础设施建设，主要包括：①国家层次制定统一的对地观测卫星发射计划，建立卫星制造、发射、维护和应用的竞争机制；②尽快建立 IP 宽带网，大幅度增加传输速率，从国家层面比较“三网合一”和“三网并行”的优劣；③加快国家地理空间信息基础设施建设。最后，应该尽快组建“中国数字地球”工作委员会。

2. 技术层面发展对策

首先，加强我国数字地球关键技术的开发和创新。美国发展经验表明，计算科学、大规模存储、卫星图像、宽带网络、互操作性和元数据是创建数字地球的重点。然而，我国与发达国家之间在这些技术方面存在很大差距。因此，需要大力加强与数字地球有关的关键技术研究和创新已刻不容缓。1m 分辨率的卫星图像商业化，说明高分辨率卫星数据已经用于支持全球范围的空间信息分析和处理，因此信息技术进步意味着巨大的商机和潜在的经济社会效益。根据我国国情国力、应用需求和国家安全的需要，迫切需要在关系国家经济和国防安全的两个领域有所突破，即加速建立我国自主、稳定、功能强大的卫星对地观测系统和空间信息传输主干网络，摆脱过分依赖国外卫星数据源、网络传输和管理技术的限制，增强我国地球空间信息产业的国际竞争实力，主要包括加速我国遥感卫星的研制和发射，建立自己的遥感卫星系列和独立稳定的对地观测空间信息源；建立健全空间地理信息采集、处理、分发和应用的技术体系、基础设施及数字产品的市场环境，满足各类应用对空间信息源的需求，特别是满足国土资源及环境动态观测和分析的需要，建立自主的对地观测卫星系列。

其次，加速我国空间信息基础设施发展。第一，盘活信息资源，驱动应用发展，充分利用我国现有信息资源潜力，利用发达国家开放高分辨率卫星数据的契机，加速多源信息的整合，推进数字地球应用系统建设。第二，关键技术创新和基础设施发展。建立有中国特色的空间信息基础设施运行与管理体系，形成我国自主的航空航天对地观测体

系，增强我国空间信息技术和相关产业的国际竞争实力，保障国家安全。第三，带动高技术产业形成和发展。通过空间信息基础设施的发展，促进和带动我国空间信息系统软件产业、空间信息服务业及其他相关产业的形成与发展，并为其应用开辟市场，创造必要的技术经济支撑环境。

最后，大力培植我国空间信息产业发展。20 世纪 80 年代以来我国陆续积累了大量空间数据，开发建设了为数甚多的基于空间信息的应用系统，其中一些技术已经达到当时国际先进水平，但仍有大批空间数据（包括航天、航空遥感数据）及其研究成果未能及时转化为应用，没有在国民经济和社会服务信息化中发挥应有的作用。国内 70%以上的地理信息系统软件市场被国外软件占领，空间信息产业十分弱小。针对以上问题，“九五”以来，我国已将 GIS、RS 和 GPS 的产业化、集成化和实用化列为“重中之重”的研究课题，组织开展了国家空间信息基础设施（NSII）关键技术及其雏形——国家资源环境与区域经济信息系统（NREDIS）的开发，并通过这些项目促进空间信息共享和相应地球空间信息产业的形成与发展。

（五）数字地球在我国的应用

我国数字地球的应用刚刚起步，但在农业发展和河流流域管理中已经取得长足进步。数字农业又称信息农业，是利用空间和信息技术形成一个包括农作物、土地、土壤从宏观到微观的监测、预测，农作物生长、发育状况及环境要素的现状与动态分析、诊断预测、耕作措施和管理方案等决策支持在内的信息农业技术系统（汪懋华，2012）。数字长江是长江流域的信息基础设施的建设，实现长江流域的可持续发展，为此进行防洪减灾和生态规划。其中，长江流域的信息基础设施建设，包括长江上游地区 1∶10 万基础地理数据库、中游 1∶5 万基础地理数据库和长江中下游及长江三角洲经济发达地区 1∶1 万基础地理数据库等。长江流域的不同比例尺的有关专题数据库，包括资源、环境、经济和社会数据的分布式数据库建设等。此外，还包括长江流域的网络化建设、长江洪水灾害的监测和预测系统建设、长江防洪调控系统平台建设、长江流域的可持续发展规划监测系统建设等（熊忠幼和张志杰，2002）。

二、数字草业技术体系

（一）数字草业的含义

随着草业生产流程需要数字化和可视化的控制，借助数字地球和数字农业的技术，数字草业应运而生，从而形成了一系列的专门用于草业生产的数字技术体系，实现草业生产、管理、经营、流通、服务等各个节点的数字化控制，实现草业按照人类需求和可持续发展的目标发展（唐华俊等，2009）。

1. 数字农业

随着中国数字地球的兴起，各行业以数字地球的理念提出了自己的“数字”理念，以生物技术和信息技术为主导的新型农业模式——数字农业（Digital Agriculture）

应运而生。数字农业是中国数字地球的重要组分部分，是数字地球在农业领域应用的具体体现。一般而言，数字农业指利用数字化技术对农业（种植业、畜牧业、渔业和林业等）生产与管理的全过程进行数字化和可视化表达、设计、控制和管理（唐世浩等，2002），其本质是将信息技术扩容到农业生产，将工业可控生产和计算机辅助设计应用于农业生产系统，通过计算机、地学空间、网络通信、电子技术和农业的融合，对农作物生长发育、病虫害防治、水肥变化及相应的环境要素进行实时监测，定期获取信息，建立动态空间多维系统，模拟农业生产过程的各种现象，达到合理利用农业资源、节约生产成本、改善生态环境、提高农作物产量和质量的目的（史明昌和王维瑞，2011）。

2. 数字草业的内涵

我国对数字草业的认识仍处于启蒙阶段。目前我国关于数字草业的表述有“精准草业”、“智能草业”、“虚拟草业”、“网络草业”等术语，尚没有形成统一的定义。草业信息化是数字草业的核心，也是其具体表现形式。以信息化为标志的第三次产业革命给各行业提供了创新的契机，信息技术的应用不仅改变了传统的草地生态系统管理思想，而且还引发了以知识为基础的产业技术革命。虽然欧美发达国家近半个世纪内建立了现代化草畜生产体系，特别是20世纪90年代后将Internet、“3S”技术、智能控制等逐渐应用于现代草地畜牧业的生产和管理，但欧美发达国家并没有草业这一专有名词和术语。草业是我国在现实国情下提出的专门学科，其内涵虽然包括了欧美等国家的草地和牧草生产，但极具特色。在我国数字草业是数字农业的一个重要分支，其基本标准和规范框架遵循数字农业，但需要考虑草业承担的食物安全和生态安全的双重使命。

一般而言，数字草业是利用数字化技术实时监测草业生产的整个流程，评估每个生产节点的生态、生产、经济，定期获取草业生产过程的信息，建立多维动态系统，对比分析草业生产流程中的各种外在表现，从而选择出资源利用率高、生产成本和环境负荷低、效益高的生产方案。通过数字化设计草业生产过程的生产、管理、经营、流通、服务和草业环境，可视化表达每个节点和流程，实现草业生产过程的智能化控制，使草业按照人类需求和可持续发展的目标发展。

（二）数字草业的主要内容

数字草业主要包括草业要素的数字化、草业过程的数字化和草业管理的数字化三个方面的内容。

1. 草业要素的数字化

草地农业系统包括前植物生产层、植物生产层、动物生产层和后生物生产层，这四个生产层通过草丛-地境界面（A）、草地-动物界面（B）和草畜-经营管理界面（C）连缀，而成为完整的草业系统。因此，草地农业系统包括生物要素（动物和植物）、环境要素、技术要素和草业社会经济要素4类组分。每一类又包含多个因素，如生物要素中既有动物又有植物，动物包括家畜和野生动物，植物包括多种多样的牧草。家畜

也包括不同种类的家畜，同一种类中又包括不同的品种；牧草种类既有禾本科和莎草科牧草，又有豆科牧草。禾本科中包括早熟禾和垂穗披碱草等多种，豆科牧草中包括紫花苜蓿和阴山扁蓿豆等多种。牧草的生长发育与光合作用、呼吸、蒸腾和营养等因素密切相关（史明昌和王维瑞，2011）。所有这些要素，在传统草业中直接用属性表达，而在数字草业中，均需按照一定的要求和标准用数字化的方法表达，这一过程称为草业要素的数字化。

2. 草业过程的数字化

草业生产过程包括土-草-畜-产品-销售-消费等多个节点，不仅有其内在的规律和机制，而且还与外部环境有着不可分割的联系，这些内在的规律和外在的联系虽然部分可以用科学实验佐证，抽象理论分析，但有些是无法用科学实验表达的。数字草业中各种草业过程的内部规律和外部联系均需要用数字草业模型去揭示与表达，从而使草业研究的成果在更大的地理范围和更长的时间尺度上进行推广应用（史明昌和王维瑞，2011）。目前草业模型种类较多，既有遥感估测模型，又有统计模型，内容涉及草地生产力估算、牧草适应性评价、牧草生长过程模拟、草畜平衡优化、混播牧草竞争等，这些模型是实现草业过程数字化的基础。

3. 草业管理的数字化

草业管理大致包括草业行政管理、草业生产管理、草业科技管理及草业企业管理（史明昌和王维瑞，2011）。不断整合和创新草业数字化方法，如应用各种数学规划方法对草业问题进行辅助决策，充分利用专家经验将草业过程的模拟与草业的优化原理相结合，对某些草业决策提供支持等，是实现草业管理数字化的必由之路。

（三）数字草业的基本构成

包括草业信息标准化建设、草业信息实时获取与处理、草业信息数据库建设、信息服务平台建设和草业信息管理系统建设（史明昌和王维瑞，2011）。

1. 草业信息标准化建设

草业信息描述、定义、获取、表示形式和信息应用环境等尚未形成统一的标准，利用率低。因此，建立数字草业的第一步工作是开展草业信息标准化，将草业活动的各个环节采用标准化方式管理，以便有机衔接信息的获取、传输、储存、分析和应用，这有助于开发和利用草业信息资源，扩大其共享范围。

草业信息标准化是草业标准化体系的重要组成部分。广义的草业信息标准化是指对草业信息及信息技术领域内最基础、最通用、最有规律性、最值得推广和最需共同遵守的重复性事物与概念，通过制定、发布和实施标准，在一定范围内达到某种统一或一致，从而推广和普及信息技术，实现信息资源共享。

2. 草业信息实时获取与处理

草业信息是实现数字草业过程中最重要的基础信息设施建设的内容之一。数字草业

建设要充分依靠各种草业信息的支持，而草业资源分布、草业生产信息等大部分草业数据是基于空间分布的。因此，在数字化的草业时代，如何快速准确地获取草业信息资源，并进行开发利用是重中之重。随着科学技术的发展，草业信息获取的手段也不断改进，遥感技术和全球定位系统的有机配合，使得实时、高精确定位的草业信息获得成为了可能，结合计算机网络技术快速、准确的数据传输能力，以及地理信息系统的强大的数据处理能力，为数字草业的信息获取与处理提供了技术保障。

3. 草业信息数据库的建设

草业信息数据库是实施数字草业的基础，主要包括基础数据库、专业数据库、模型库、知识库、方法库和元数据库。基础数据库存储基础地理信息数据、水文气象数据、社会经济数据和遥感影像数据等；专业数据库包括标准法规数据、草业生物数据、草业环境资源数据、草业经济数据等，它是草业信息数据库的核心；模型库、方法库和知识库中分别存储数字草业相关的专业模型及其参数、数据处理方法相关的公式和解决具体问题的知识规则；元数据库存储以上各类数据的元数据，是实现信息资源共享的前提。

4. 信息服务平台建设

数字草业涉及草业生产、草业管理的各方各面，这样一个庞大的系统工程必须有先进的技术手段和框架体系作为支撑，并使各个部分构成一个有机整体，以实现数据、草业模型及知识等多层次资源的高度共享和集成。信息服务平台能有效解决高吞吐量的计算、远程数据访问与服务、分布式异构环境及协同计算等难题，是实现共享机制的关键，其主要功能是应用服务和资源管理。信息服务平台由信息服务中间件、模型库、知识库和资源服务管理器等组成。

5. 草业信息管理系统建设

数字草业的另外一个主要方面，就是草业信息管理系统建设，包括草业各子专题系统的建设，如土壤水分监测子系统、土壤养分监测子系统、牧草病虫害监测子系统、栽培草地灌溉子系统、草地生产力估测系统、草地载畜量评价系统、草业机械传感控制子系统、影像识别子系统、牧草长势监控子系统、自动/人工智能化监测系统和决策支持系统等，它存在于数字草业系统中的各个阶段。这些都需要综合利用 RS、GIS、GPS 及 Internet 技术和农业电子、电气化技术，从而实现现代化的高效草业生产。

（四）我国数字草业的特点

虽然我国数字草业发展刚刚起步，但其也具有以下特点。

1. 数字草业是多领域、多学科技术综合利用的产物

数字草业是地球科学技术、信息科学技术、空间科学技术等现代科学技术与传统草业科学交融的前沿学科，是交叉形成的综合技术体系。它是卫星遥感遥测技术、全球定

位技术、地理信息系统、计算机网络技术、虚拟现实技术和自动化的农机技术等高新技术与地理学、草学、生态学、植物生理学、土壤学和气象学等基础学科的有机结合，综合利用以实现草业过程中对牧草、土壤及家畜等要素从微观到宏观的管理与监测，从而实现草业生产空间信息的有效管理（史明昌和王维瑞，2011）。

2. 数字草业涉及多源、异构、多维、动态的海量数据

基础地理信息、草业资源信息、草业生产信息和草业经济信息等草业数据大部分是基于空间分布的，具有多源、异构、多维、多比例尺、动态和大数据量等特点（梁天刚等，2011）。多源是指获取数据的途径多样，可以通过遥感、遥测和实地调查等多种不同的手段获取。异构是指数据格式不同，包括遥感影像、图形的栅格数据和矢量数据，还包括音频、视频和文本等格式的数据。多维是指数据高达五维，包括空间立体三维、时间维及相对五维空间。多维特性的时空数据必然导致数据是动态变化的、海量的。对于多维、海量数据的组织与管理，特别是对时态数据的组织与管理，需要时态空间数据库管理系统，它不仅能有效储存空间数据，同时还能够形象地显示多维数据和时空分析后的结果。

3. 数字草业要实现草业自然现象或生产、经济过程的模拟仿真和虚拟现实

数字草业要在大量的时空数据基础上，综合运用各类草业模型，采用三维虚拟现实的技术手段，对草业生产、经济活动进行模拟，为草业管理人员提供形象直观的方式，以便更好地进行草业宏观决策，如草业自然灾害和畜产品市场流通等方面的虚拟现实。

（五）我国草业数字建设的目标

草业数字建设是一项长期的、负责的、系统性工程。基于我国草业发展现状和国家对草业建设的需求，我国草业数字建设的目标分为近期目标和远期目标两个部分。

1. 近期目标

首先，草业信息化标准建设。主要包括草业信息术语和获取方法标准化，以及草业信息表示的标准化两个方面。前者指建立术语体系，制定新术语，修改不确切的术语；后者指分类和编码各种草业信息，将其转化为标准数据元，并统一表示法。

其次，草业信息采集系统建设。充分利用我国草业科学领域内已有的研究成果，通过遥感、DPS、自动化监测和固定的地理信息采集点，收集我国牧区天然草地和农区栽培草地的现状，以及这些草地的时空分布、不同地区的牧草生产潜力和天然草地初级生产力、不同地区土壤肥力现状、草地灾害分布现状、养殖分布和家畜等多种空间和属性信息，建立草业信息采集系统。争取以可靠和先进的手段获取信息，保证信息的准确性和适时性，为其他业务系统提供数据支持。

再次，草业信息数据库建设。在GIS平台上，利用空间数据管理技术，建立完善、权威的草业信息数据库，对海量、多类型、既具有空间分布特征又具有时空变化特征的草业信息进行高效管理，实现草业信息的无缝集成和建库管理及数据库的联动，维护数

据的完整性和一致性。

最后，草业信息管理系统建设。利用“3S”、计算机、自动化等技术，建立包括天然草地和栽培草地土壤监测与评价系统、家畜与饲养动物品种和习性系统等在内的草业信息管理、分析和决策系统，对草业生产行为和草业布局做出科学合理评价，为管理部门提供决策支持。

2. 远期目标

首先，建立牧草栽培、天然草地监测、家畜生长监测等数字化技术服务平台，实现草业生产过程与“3S”技术的有机结合，为我国草业信息获取、分析、管理、上报、决策与发布提供支持，为我国草业现代化和草业信息化提供全面、可靠的服务。

其次，建立基于网络的农业部、省级、县级草业主管机构之间互联互通、有机集成的一体化数字草业信息共享交换平台，实现不同级别草业主管机构、不同地区草业主管机构间的无缝对接，实现长效的、高效的数据共享机制。

最后，逐渐完善涉及草业生产流程的各种模型，深化和完善草业基础信息平台。

三、数字草业研究展望

我国数字草业虽起步较晚，但在草地生态系统模拟和决策支持方面也开发了一系列模型，包括草地生物量和生产力的估算模型（朴世龙等，2004）、草地利用模型和载畜量与草畜平衡模型（Cui et al.，2012；金花，2008）、天然草地-家畜系统仿真和优化管理模型（王贵珍和花立民，2013）等，并且研发了一些信息管理和决策支持系统，如苜蓿病虫害诊断防治专家系统（谷艳蓉等，2005）、中国草业开发与生态建设系统（杨永顺等，2007）等。

草地生态系统模拟模型可分为统计模型、系统生长模型和区域仿真模型三种类型。统计模型主要有植被潜在生产力估计模型（如 Miami 模型、Chikugo 模型等），以及用于次级生产估算的各种草地利用模型。系统生长模型，又称生态过程模型或生态生理模型，主要有应用于人工草地产量模拟的 EPIC 模型、YIELD 模型，以及用于天然草地和永久性人工草地-家畜系统动态模拟的 SPUR 和 Grass-Gro 等。区域仿真模型可以描述区域植被生理生态功能、物理环境与植物之间的物质循环，是目前仿真模型的热点，主要有陆地生态系统模型（TEM）、卡萨生物圈模型（CASA）、草地生态系统模型（CENTURY）、生物地化循环模型（BIOME-BGC）等，这些模型都把植物生长看成环境因子的函数，可以与大气环流模式（GCM）相耦合，有利于开展区域或全球尺度生态系统结构与功能的动态研究。

作为主要的陆地生态系统，区域尺度草地生态系统模拟技术也得到了长足发展，尤其是随着遥感技术和地理信息技术的发展与应用，草地生态系统动态监测技术实现了从传统地面监测到数字化监测的飞跃，利用不同遥感平台、不同类型的传感器开展了大量草地生产力估算、灾害监测、草地植被退化监测等方面的理论研究与技术探索（朴世龙

等，2004；金花，2008；何咏琪等，2013；杜自强等，2005），推动了数字草业的发展。首先，基于 APAR 的全球植被生产力模型的建立，带动了一批基于卫星数据的光能利用率模型的研究，如 CASA、GLO-PEM 等。其次，草地生产力全遥感监测模型实现了草业数字化管理中的动态信息实时更新，将草地生态系统管理的水平提高到一个新的层次。再次，草地灾害和荒漠化监测研究方面，澳大利亚将草地环境指标动态监测信息、草地长势监测信息用于干旱区草地畜牧业应急管理，建立了一系列草原-家畜系统监测预警模型，如 Rangepack、Pasture from Space 等对草地生产-环境-经济复合体系进行实时监测和预报控制，还进行草业系统安全运行决策与风险评估，并结合网络技术实现了草地管理远程决策支持。最后，伴随着传感器制造技术、传感器识别能力、厘米级空间分辨率、纳米级带宽的高分传感器的发展，大大拓宽了草地资源遥感指标的监测范围，美国、加拿大、新西兰、澳大利亚等国和欧洲发达国家开发了多种草业管理信息系统、专家系统和决策支持系统。据统计，美国目前正在使用或准备使用的农牧业专家系统超过 1000 个，美国 48%的农牧民拥有互联网接入技术，专家系统是日常生产中的主要应用技术；澳大利亚、新西兰等畜牧业发达的国家，数字化技术应用已深入到草业生产、管理、市场经营的各个环节，澳大利亚 40%以上的家庭牧场应用专家决策支持系统来进行草地放牧系统管理和生产经营。随着草业管理专家系统和软件技术的发展，各种用于科研和生产的草地数字化管理、决策支持硬件技术产品也得以迅速发展，如用于草地群体盖度的无损伤测量仪器、草地生产速率无损伤测量仪器及装载了各种决策支持信息的掌上电脑等。

目前，国际信息技术进入以网络化、空间化、智能控制为主的全面信息化阶段，数字化技术趋于硬件化、实用化、产品化。根据我国国情和草业生产发展水平，数字草业理论与技术表现出空间化、精准化、自动化、集成化的发展趋势。①草地监测技术的空间化趋势：我国草地生态系统区域辽阔、自然条件复杂，草业生产问题具有多时间、多空间尺度变化特点，基于多平台遥感的监测技术是满足草地实时数据获取的必要手段；②草业生产过程的精准模拟：不同尺度上草畜过程管理决策支持的要求不同，但结合植被生长发育过程、草地-家畜相互作用机制的生产系统动态模型是草业数字化技术的前沿领域，结合遥感定量反演、数据与模型同化，为实现可控尺度上的精准化生产控制提供工具；③草业生产管理的自动化控制：人工智能是信息领域最前沿的技术之一，应用人工智能进行田间管理参数的获取与识别，将大大提高草业生产管理的自动化和实时化程度；④草业信息技术集成化：信息技术对草业发展重要的帮助之一是远程信息通信，具有网络支持的移动存储平台将弥补电信基础设施条件带来的不便，提供更加方便的服务。

思 考 题

1. 举例说明精准草业的内涵是什么？
2. 简述我国精准草业发展的制约因素及重点方向？
3. 简述全球定位系统的特点及应用？举例说明 GPS 和 BDS 的异同点？

4. 简述数字地球及其作用？
5. 论述数字草业的内涵及主要内容？
6. 论述数字草业的特点？举例说明数字草业的应用？

参 考 文 献

承继成, 郭华东, 薛勇. 2000. 数字地球导论(第二版)[M]. 北京: 科学出版社.

杜自强, 王建, 沈宇丹, 等. 2005. 基于 3S 技术的草地退化动态监测系统设计[J]. 草业与畜牧, (11): 51-54.

谷艳蓉, 张国芳, 孟林. 2005. 苜蓿病虫草害诊断与防治专家系统的构建[J]. 草原与草坪, 5: 60-63.

郭正刚, 王锁民, 梁天刚, 等. 2004.草地资源分类经营初探[J]. 草业学报, 13(2): 1-6.

何咏琪, 黄晓东, 侯秀敏, 等. 2013. 基于 3S 技术的草原鼠害监测方法研究[J]. 草业学报, 22(3): 33-40.

胡友健, 罗昀, 曾云. 2003. 全球定位系统(GPS)原理与应用[M]. 北京: 中国地质大学出版社.

华璀, 吴健平. 2001. 中国数字地球的发展思考[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 18(1): 58-62.

金花. 2008. 基于 3S 技术支持的草地营养与载畜量评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文.

李凌浩, 王堃, 斯琴毕力格. 2012. 新时期我国草地环境科学发展战略的思考[J]. 草地学报, 20(2): 199-206.

栗恒义. 1996. GPS 的应用[J]. 导航与雷达动态, (1): 10-16.

梁天刚, 黄晓东, 任继周. 2011. 论草业科学的信息维[J]. 草业科学, 28(8): 1552-1555.

刘爱民, 封志明, 徐丽明. 2000. 现代精准农业及我国精准农业的发展方向[J]. 中国农业大学学报, 5(2): 20-25.

朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 28(4): 491-498.

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.

搜狗百科. 2013. 北斗二号卫星[EB/OL]. http: //baike.sogou.com/v61184981.htm. 2013.

搜狗百科. 2015. 北斗导航定位卫星[EB/OL]. http: //baike.sogou.com/v55221.htm. 2015.

孙小礼. 2000. 数字地球与数字中国[J]. 科学学研究, 18(4): 20-24.

唐华俊, 辛晓平, 杨桂霞, 等. 2009. 现代数字草业理论与技术研究进展及展望[J].中国草地学报, 31(4): 1-8.

唐世浩, 朱启疆, 闫广建, 等. 2002.关于数字农业的基本构想[J].农业现代化研究, 23(3): 183-187.

汪懋华. 2012. 数字农业[M]. 北京: 电子工业出版社.

王贵珍, 花立民. 2013. 牧场管理模型研究进展[J]. 草业科学, 30(10): 1664-1675.

王晓华, 郭敏. 2005. GPS 卫星定位误差分析[J]. 全球定位系统, 30(1): 43-47.

文成志. 1998. 搞好家庭牧场建设促进现代化畜牧业发展[J]. 四川草原, (4): 16-18.

熊忠幼, 张志杰. 2002. 实现"数字长江"宏伟构想[J]. 中国水利, (4): 45-47.

亚洲流体网. 2013. GPS 卫星系统组成[EB/OL]. http: //www.liuti.cn/news/145592.html. 2013.

杨理, 侯向阳. 2007. 完善北方草原家庭承包制与天然草地可持续管理[J]. 科技导报, 25(9): 29-32.

杨永顺, 陈全功, 杨丽娜, 等. 2007. 基于WebGIS的《中国草业开发与生态建设专家系统》的开发[J]. 草业科学, 24(10): 31-35.

赵春江, 薛绪掌, 王秀, 等. 2003. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 19(4): 7-12.

赵旭, 韩天虎, 孙琼, 等. 2013. 甘南藏区放牧制度及其时效性评价[J].草业科学, 30(12): 2077-2083.

周露, 刘宝忠. 2004. 北斗卫星定位系统的技术特征分析与应用[J]. 全球定位系统, 29(4): 12-16.

周旭英. 2008. 中国草地资源综合生产能力研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社.

Cui X, Guo ZG, Liang TG, et al. 2012. Classification management for grassland using MODIS data: a case study in the Gannan Region, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 33(10): 3156-3175.

Searcy SW. 1996. A US view on the precision farming revolution[A]. *In*: Brighton Crop Protection Conference: Pests & Diseases-1996, Vol. 3: Proceedings, Brighton, UK[C]. Farnham: British Crop Protection Council: 1113-1120.

Yu X, Zhang J, Jia TT, et al. 2015. Effects of alternate furrow irrigation on the biomass and quality of alfalfa (*Medicago sativa*)[J]. Agricultural Water Management, 161: 147-154.

（S-1404.31）

草业信息学

PRATACULTURAL
INFORMATICS

科学出版中心 生物分社
联系电话：010-64012501
E-mail:lifescience@mail.sciencep.com
网址：http://www.lifescience.com.cn
销售分类建议：草业科学

科学出版社
互联网入口

生命科学订阅号
赛拉艾芙

本书更多资源
请扫二维码

生命因你而精彩！

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-052745-

9 787030 527455 >

定价：118.00 元