

中国农业科学院 · 农业资源与农业区划研究所 | 科技创新工程系列专著 |



DIGITAL GRASSLAND
THEORY, TECHNOLOGY AND PRACTICE

数字草业 理论、技术与实践

| 辛晓平 闫瑞瑞 姚艳敏 唐华俊 等 著 |



科学出版社

数 字 草 业

理论、技术与实践

辛晓平 闫瑞瑞 姚艳敏 唐华俊 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

数字草业是科学问题驱动下的技术研究。本书从数字草业的科学原理、技术发展、产品应用等三方面,提炼了我国现代数字草业理论与技术框架。全书共分三篇十章:第一篇剖析了数字草业的概念、基本原理及发展趋势;第二篇系统论述了数字草业核心技术内容,包括数字草业技术标准与规范、草地生物环境要素监测技术、草地生产监测技术、草地生态退化监测技术、草地生产模拟技术、天然草地与栽培草地生产管理技术;第三篇介绍了我国数字草业技术软硬件产品研发及应用情况。

本书为草业信息科学发展奠定了理论基础,为草地优化管理提供了学科支撑,对于促进农牧业信息化、科学化和现代化具有实践意义。本书可供从事草业科研管理和生产经营等相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字草业:理论、技术与实践 / 辛晓平等著. —北京:科学出版社, 2015.11
ISBN 978-7-03-044541-4

I. ①数… II. ①辛… III. ① 数字技术—应用—草原建设—研究
IV. ①S812.5-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124624 号

责任编辑:李秀伟 白雪 / 责任校对:郑金红

责任印制:肖兴 / 封面设计:刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:28 3/4

字数:680 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《数字草业——理论、技术与实践》

著者名单

(按姓氏汉语拼音排序)

陈宝瑞	春 亮	段庆伟	李 刚	李向林	毛克彪
蒙旭辉	倪 静	隋雪梅	唐华俊	万里强	王 旭
吴 琼	吴宏军	辛晓平	徐大伟	徐丽君	闫瑞瑞
姚艳敏	张 钊	张保辉	张宏斌	周 磊	朱晓昱

序

草业科学是一门古老而又新兴的科学，内涵丰富。人类先祖从采集渔猎到捕获动物，形成了最原始的草业——草地畜牧业。在协调动物生产与植物生产关系的同时，草业科学的元素就开始累积。草业从生产特性上看包括前植物生产层、植物生产层、动物生产层、后生物生产层等 4 个层次。草原是处于植物生产与动物生产之间的界面，长期以来人们对于草业的界面特性认识不足，因此在草业科学的发展过程中不是被纳入植物生产类（如西欧），就是被纳入动物生产类（如我国）。因此，在很长一段时期，草业科学不是一门独立的学科。直至 20 世纪 40 年代，草业才从西方农学与畜牧学中分化出来，形成独立的学科体系。草业科学是以维持草地生态系统健康和获得相关产品为目的，研究从草地资源到草地农业系统的发生与发展的科学。

我国草地放牧利用已有 3000 年以上的历史，草原农垦历史亦逾千年，比世界上其他几个草地大国早得多，可是在草业发展方面，却较其他国家落后。现代草业主要是工业革命以后欧美的原始农/牧业系统吸收现代科学成果的产物，牧草对于欧美农业的影响不亚于农作物。栽培牧草在西方农业中被认为是绿色黄金，意大利早在 1550 年就开始豆科牧草的大面积栽培，欧洲西部稍晚一点，英国不迟于 1645 年。西欧发达国家成功实施的以栽培草地为基础的先进草地畜牧业不仅有高度发展的生产力，还保证了人与自然的协调相处；草业是目前美国最大的农业产业，食品工业 78% 的产值来自草。欧美国家都非常重视草业生产各环节的高效管理和有效转化。20 世纪中叶以来，随着计算机技术、对地观测技术的发展，欧美发达国家都逐步建立了现代草业监测与管理系统，大大提高了草地经营管理的水平和效率。

近 30 年来，我国草业迅速成长，发展了一系列草业生产单项技术，但从系统视角开展不同草业生产层及其界面的管理研究还在肇始阶段。数字草业就是以草业生产各环节的定量监测、管理控制为目的的一门科学，是现代信息技术与草业科学的交叉学科。它在数字地球、数字农业的基本标准和规范框架下，构建面向草业系统现代化管理的数字技术和理论框架，通过草业要素、草业过程、草业管理的数字化，定量认识草业系统中各种要素（生物的、环境的、经济的）属性及其相互关系的动态规律，并应用于草业生产和经济发展。数字草业可以大大丰富草地畜牧业生产监测、管理、评价与决策的技术选择，完善我国草地畜牧业生产各环节的管理，探索农牧业信息化、科学化和资源节约型发展模式，有效提高我国草地畜牧业生产能力。

数字草业将有力拉动现代草业生产方式的转变和生产水平的提高。通过引进国外先进技术与再创新，我们可以发挥后发优势，迅速弥补草地农业在研究和管理上的不足，通过栽培草地生产过程模拟与管理、不同营养级之间转化过程的精准设计，提高草地农业的生产效率和经济效益；通过对不同自然和经济属性的草地系统进行合理空间规划，协调草业生产和生态环境的关系，在维持草地生态健康的前提下，促进现代草业生产方

式的转变，建立资源节约、环境友好的新型现代草业生产体系。

数字草业技术将促进草业生产、经济与产业化过程的科学管理决策。我国草业比较薄弱，生产规模小、科技水平及含量相对较低，受自然条件、市场因素和政策影响波动较大。草业发展进入新阶段后，生产过程由过去的资源约束变为资源和市场的双重约束，集约化、产业化经营成为现代草业发展的必由之路。数字草业技术实现对草业生产经济与产业化过程定量监测，快速、准确地收集草业生产的实时信息，有力加强草业管理决策的准确性、科学性和权威性。

数字草业技术是现阶段提高我国草业经营效率、长远地保持草地畜牧业可持续发展的技术保障。通过数字草业技术推动现代草业建设，实现经济与生态双赢的草地可持续生产，发挥草地作为绿色屏障的生态功能，体现草地作为后备食物资源的生产功能，促进东、中、西协调发展，促进西部地区生态和生产协调发展，是把我国西部广大草原区建设成为社会、自然、经济协调发展的、适合人类生存的环境的关键。

“展翅雏鹰多珍重，青青诸子胜于蓝”。希望数字草业能借现代信息技术发展而迅速成长，完善开拓草业学科、为草业生产发展保驾护航。

任继周

2015年6月

前 言

本书凝练了数字草业课题组 15 年来的主要研究。1999~2000 年,课题组承担了农业部计划司“我国北方草原区耕地和草地资源变化遥感监测”任务,提出了草地生产力/产草量的监测问题,之后十余年,我们一直致力于草地生产力监测、模拟及应用。针对草地生产力/产草量模拟精度提高的问题,课题组的研究逐渐从全国尺度监测模型构建,转向局域尺度产品验证与算法更新;从笼统的草地生产力监测,转向草原冠层主要植被参数[光合有效辐射吸收比例(FPAR)、叶面积指数(LAI)、光能利用率(LUE)]与环境参数(水分、温度)反演;从静态光学利用率模型,转向基于植被生物地化过程的动态模拟;从天然草原监测模拟,转向天然及栽培草地的模拟与诊断。这些理论方法进展初步构建了数字草业的理论和技术框架。学以致用,为了便于技术成果转化应用,自 2001 年开始课题组基于现代信息技术对草业专业模型进行集成升级,研制了草业智能管理决策平台、草地信息监测平台、草业监测管理掌上平台等软硬件技术产品,为政府决策、生产管理和科学研究提供快捷实用的工具。

课题组基于工作人员十余年来的研究成果、历届研究生毕业论文、博士后出站报告,2010 年组织完成了第一稿。但是,当时有些章节的研究尚欠火候,成果应用还比较有局限性,所以又进行了几年的沉淀和完善。这次重新组织书稿,除纳入“十二五”最新成果以外,还特邀倪静、李向林等承担了部分章节的撰写工作。

本书由唐华俊和辛晓平提出编写大纲并负责完成全书的修改定稿,由闫瑞瑞进行统稿、图文编辑校正。各章节主要著者如下:第一、第二章,辛晓平、唐华俊;第三章,姚艳敏、倪静、张保辉;第四章,王旭、毛克彪;第五章,李刚、隋雪梅、吴琼;第六章,周磊、张宏斌;第七章,陈宝瑞、张钊、徐丽君、春亮、闫瑞瑞、段庆伟、蒙旭辉;第八章,闫瑞瑞、徐大伟、李向林、万里强;第九章,张保辉、闫瑞瑞、徐大伟、吴宏军;第十章,唐华俊、辛晓平、朱晓昱。

本书共三篇十章。第一篇介绍了数字草业的基本概念及内涵,探讨了数字草业的研究对象及特点,回顾了草业发展历程,阐述了数字草业研究的背景和意义,剖析了数字草业的基本原理(理论基础、技术原理)及发展趋势。第二篇系统论述了数字草业核心技术内容,包括数字草业技术标准与规范、草地生物环境要素监测技术、草地生产监测技术(草地生产力及冠层 LAI/FPAR/LUE 反演等)、草地生态退化监测技术、草地生产模拟技术及天然与栽培草地生产管理技术。第三篇介绍了我国数字草业技术软硬件技术产品及应用情况,包括数据产品(草业科学数据共享中心)、软件产品(草地监测管理平台、栽培草地管理平台、远程诊断平台)及硬件产品(基于手持终端的管理诊断系统)。全书还探讨了我国数字草业发展面临的问题,对数字草业发展趋势进行了展望、预测。

数字草业是在新兴学科背景下由科学问题驱动的技术研究。以前农业信息化研究往

往是“生产”或“现实”问题驱动的研究，从而缺乏科学理论的指导，忽视了要面对的科学问题。本书的学术思路是在新兴信息技术及其理论指导下，成果紧密结合当前主流信息技术、草地监测与草业管理专业理论的最新进展，跟踪国际草业数字化研究的前沿领域，将先进的理论和技术应用到我国草业产业化发展和生产实践中，探索草业数字化监测和管理关键技术、相关科学问题与假设，提炼我国现代数字草业理论与技术框架。本书成果为草业信息科学发展奠定了理论基础，为草地生产管理优化决策提供了学科支撑，对于促进农牧业信息化、科学化和现代化具有实践意义。

本书集成了前后 3 个五年计划的连续攻关研究成果，我们要特别感谢任继周先生在学术思路上的点拨、张新时先生对初期研究的肯定和支持，他们的认可，给了我们勇往直前的动力。

同时，感谢国际科技合作项目“草地生态系统优化管理关键技术合作（2012DFA31290）”提供了国际合作交流、引进吸收国外先进技术的机会，使得我们的研究与国际同行接轨，并直接促成本书的最终完成；感谢国家牧草产业技术体系专项（CARS-35）资金的支持；感谢 973 计划项目“草地与农牧交错带生态系统重建机理及优化生态-生产范式（G2000018607）”、863 计划项目“草业信息管理和决策系统研究（2002AA243021）”给予我们最初的经费支持；感谢国家农业科学数据共享中心草地与草业数据分中心（<http://grassland.agridata.cn/>）为本书提供翔实的数据支持。

我国草业学科发展较晚，数字草业尚处于肇始阶段，很多科学问题尚待解决，本书只是对近十余年数字草业研究工作的一个阶段性总结，由于水平所限，难免有疏漏之处，敬请批评指正。

著 者

2015 年 4 月

目 录

序 前言

第一篇 理 论 篇

第一章 数字化管理：从数字地球到数字草业	3
第一节 数字草业的基本概念与内涵	5
第二节 数字草业的研究背景	7
第三节 数字草业的研究意义	10
参考文献	12
第二章 数字草业的基本原理	13
第一节 数字草业的理论基础	14
第二节 数字草业的技术原理	18
第三节 数字草业的研究进展与趋势	21
参考文献	25

第二篇 技 术 篇

第三章 数字草业技术标准、规范与信息系统	31
第一节 数字草业技术标准与规范	31
第二节 数字草业信息系统	57
参考文献	64
第四章 草地生物环境要素监测技术	67
第一节 草地生物环境监测技术	67
第二节 草地环境要素遥感监测技术	84
参考文献	90
第五章 草地生产监测技术	93
第一节 草地生产力模型研究与应用	93
第二节 草地 LAI/FPAR 反演方法改进	105
第三节 草地 LUE 反演方法改进	143
第四节 草地生产力模型研究展望	164

参考文献	164
第六章 草地生态退化监测技术	168
第一节 草原生态系统退化遥感监测进展及趋势	168
第二节 草地物种及牧草质量监测技术	172
第三节 草原植被退化监测技术	201
参考文献	223
第七章 草地生产模拟技术	227
第一节 草地生产力与碳固持模拟技术	227
第二节 栽培草地生产模拟技术	260
第三节 草地-家畜过程模拟技术	277
参考文献	289
第八章 草地生产管理技术	295
第一节 天然草地管理决策技术	295
第二节 栽培草地设计与管理技术	320
参考文献	351

第三篇 实 践 篇

第九章 数字草业技术平台	357
第一节 草业科学数据共享中心	357
第二节 草地监测管理平台	363
第三节 栽培草地管理平台	392
第四节 远程管理诊断平台	416
第五节 基于 PDA 的牧草管理系统开发	426
第十章 前景和展望	442
第一节 我国草业发展趋势	442
第二节 数字草业发展：问题与展望	443

第一篇

理 论 篇

32 亿 hm^2 ，占地球陆地面积的 20%。作为最大的陆表生态系统，草地不但是主要的生态屏障，也是主要的食物来源和生产材料。草地生态系统根据其结构和功能特性、人类干预的程度，可以分为天然草原和草地农业系统两大类。天然草原是在数百万年到上千万年的进化过程中逐渐形成的一个完整的生态系统，它不仅是家畜的放牧场，也是特殊的生物资源和基因资源宝库，对人类环境和文明发展具有极其重大且不可代替的作用；草地农业系统是 19 世纪末期以来，随着环境问题、粮食问题的出现，为了提高生态系统生产力和稳定性、推进畜牧业现代化进程，形成的以多年生牧草及豆科牧草为主从事畜牧业生产的土地管理制度，包括永久性栽培草地和高产饲草基地。数字草业就是在数字地球和数字农业的基本标准和技术规范下，研究和解决上述草地生态系统及产业中的数字化表达、控制、管理与决策等问题，比狭义的数字农业（数字种植业、数字养殖业）具有更宽泛的内容，既涉及草地生态系统自然属性的数字化表达与管理，亦涉及草地生产系统产业属性的数字化研究与决策。

第一节 数字草业的基本概念与内涵

一、草业的发展及概念

在讨论数字草业的概念以前，我们首先回顾一下“草业”的发展及概念。

草业科学是一门古老而又新兴的科学，内涵丰富。人类先祖从采集渔猎到捕获动物，驯化饲养，收获奶、肉、皮毛等动物产品，形成了最原始的草业——草地畜牧业。畜牧业的目的是动物生产，手段或过程是牧草等植物生产，在协调动物生产与植物生产的关系的同时，草业科学的元素就开始累积。处于植物生产与动物生产之间的草原，是两者之间的界面。长期以来，人们对于草业的界面特性认识不足，因此草业科学在发展过程中不是被纳入植物生产类（如西欧），就是被纳入动物生产类（如我国）。因此，在很长一段时期，草业科学不是一门独立学科。第一次世界大战后，羊毛、肉类不足，价格上涨，以畜牧生产为目的的草业科学在 20 世纪 30 年代开始发展，40 年代趋于成熟，从西方农学与畜牧学中分化出来，形成独立的学科体系。

虽然我国拥有大面积的草原、几千年的畜牧业历史，但我国“草业”是一个发展较晚的新产业，在长期“以粮为纲”思想的影响下，畜牧业仅仅是副业生产的传统观念深入人心。与林业相比，草原也不能像森林一样，直接提供以生态系统第一性生产力为主的产品，因此形成在生产上重农轻草、在生态上重农轻草的观念，草业产业和学科发展长期生存于夹缝之中，尽管如此，中国草业发展和草原学科研究在过去的一个世纪中仍取得了若干成就。

20 世纪初，我国就开始了草原科学研究。新中国成立后，经济水平不断发展，草原科学所面临的任务与内涵有很大扩展。1984 年，钱学森在《草原、草业和新技术革命》一文中首次正式提出“草业”概念，认为草业产业是草原的经营和生产，应当突破传统放牧的方式，利用科学技术把草业变成知识密集的产业，这是我国第一次对草业给出定义。许鹏（1985）提出：草业是以草资源为基本生产资料，从事生产经营的产业部门，并给出了草地生产系统的结构与流程图，提出草地生产结构的核心是草地与牲畜，它们

分布式和开放网络信息系统,为我国资源合理利用、环境保护、减灾防灾、国防安全、知识传播和科学研究服务。

信息时代的来临正在改变人类的生存和发展方式。数字农业(digital agriculture)是“数字地球”在农业上的具体应用和实现,它将计算机技术、微电子技术、网络和多媒体技术、空间信息技术等方面的技术发展应用于农业生产,改变了几千年来传统农业的生产方式,翻开了农业发展的崭新一页。20世纪90年代,美国国家研究委员会(National Research Council)进行了农业高新技术发展战略研究,1997年,经过美国国家科学院、美国国家工程院的两院院士组织讨论,发表了名为《21世纪的精细农业——农作物管理中的地学空间信息技术》的报告,全面分析了地学空间信息技术在改善作物生产管理决策和改善经济效益方面的巨大潜力,阐明了空间信息技术为现代农业发展提供的机遇。

20世纪90年代中期以来,数字农业在理论和技术体系方面迅速完善。“数字农业”使用计算机技术、地学空间技术、网络通讯技术、电子工程技术等数字化技术,结合生物工程技术及农业生产管理技术,将农业所涉及的农学、地理学、生态学、土壤学和植物生理学等基础学科有机结合,进行数字化和可视化的表达、设计、控制、管理,对农业生产、管理、经营、流通、服务等领域进行数字化设计、可视化表达和智能化控制,达到合理利用农业资源、降低生产成本、改善生态环境等目的,使农业按照人类的需求目标发展。

“数字农业”可以说是一次世界性农业科技革命的历史机遇。我国学界和政府对于数字农业和农村信息化工作给予了高度重视。“十五”期间,科技部启动了“数字农业技术研究专项”,优先选择能对未来农业发展产生重大影响和具有重大应用前景的技术和产品,从数字农业技术标准与发展战略、数字农业关键技术与产品开发、数字农业技术系统集成与平台构建、数字农业示范等4个方面开展研究,逐步建立了我国数字农业技术体系;“十一五”、“十二五”期间,国家高技术研究发展计划(863计划)在已有工作基础上,在现代农业技术领域设立了数字农业技术专题,加大对以“数字农业”为主要内容的农业信息技术研究的投入。专题针对我国农业和农村经济发展的重大需求,围绕我国农业产前决策、产中管理、产后农产品流通的关键环节,瞄准国际数字农业发展的前沿技术,以农业生物-环境信息获取与解析技术、农业过程数字模型与系统仿真技术、虚拟农业与数字化设计技术、农业数字化管理技术、农业数字化控制技术等内容为切入点,组织实施了一批“数字农业”关键技术,初步构建我国“数字农业”技术框架。

国家农业信息化工程技术研究中心赵春江认为,“数字农业”将工业可控生产和计算机辅助设计的思想引入农业,把信息技术作为农业生产力的重要因素,参与农业各个环节并使其成为不可缺少的组成部分(赵春江和薛绪掌,2005)。数字农业依据其操作对象尺度的大小、实现功能的不同而表现出一定的层次性,主要内容包括对农业不同要素(生物要素、环境要素、技术要素、社会经济要素)、不同方面(种植业、畜牧业、水产业、林业等)、不同过程(生物过程、环境过程、经济过程)、不同水平(分子水平、细胞水平、器官水平、个体水平、群体水平、社会水平)、不同部门(生产、科研、教育、行政、流通、服务等)的数字化表达、设计、控制和管理。总之,数字农业技术的不断发展正在深刻地改变农业生产的全过程,代表着现代农业生产管理的方向。

数字草业是数字农业的一个重要分支,也是数字地球的重要研究内容(唐华俊等,2009)。草地生态系统是陆表最重要、分布最广的生态系统类型之一,世界草地总面积

对草地生态系统各要素（环境要素、生物要素、经济要素等）及其重要过程进行监测、模拟、管理与控制。数字草业，在宏观上进行区域草业生态、生产、经济的监测与评估，为草业可持续发展提供决策支持；在微观上通过专家系统和知识工程建设，进行草地生产过程的数字化管理与控制，最大限度地优化生产投入、产量和效益。

数字草业虽然是数字农业的分支，但是其研究对象比数字农业、数字林业更为复杂。狭义的数字农业的研究对象是人工化程度较高的农田生态系统，其生产过程的可控程度比较高，生态系统成分与自然生态系统相比较简单，与数字技术结合可以达到很高的精细化程度。数字林业与数字草业一样，从属于数字农业与数字地球的框架与概念，但是从产品属性看，林业是以生态系统第一性生产力为产品，不涉及动物与植物的相互作用，所以数字林业的研究对象相对要单纯一些，而数字草业必须要考虑植被与家畜的动态关系。

数字草业的研究对象包括草业的三个子产业，草食畜牧业、饲料牧草业和生态草业，这三个子产业都基于天然草地系统和草地农业系统进行产品生产。因此，数字草业的研究要素不但包括三个子产业的各个生产环节，也涉及天然草地系统和草地农业系统的自然属性和人文属性。由于研究对象的复杂性，数字草业比数字种植业、数字养殖业具有更宽泛的内容，既涉及不同子产业自然属性的数字化表达与管理，亦涉及草业系统产业属性的数字化研究与决策。其中饲料牧草业数字技术研究以植物生产加工过程为核心，从技术角度看比较接近数字种植业；生态草业数字技术研究以草地生态系统的生物质生产和生态服务为核心，比较接近数字林业；而草地畜牧业数字技术研究的核心是草地-家畜生产系统的自然、生产和经济过程，数字林业、数字种植业、数字养殖业的同类技术均有所涉及。

数字草业包括三方面内容：一是草业要素的数字化，即对草业的生物、环境、经济的信息实现全面数字化；二是草业过程的数字化，即对草业过程的内在规律及外部联系的数字化表达，最常用也最有效的是利用数学模型对经验知识进行集成，从经验认知提炼和抽象出机理，从而大大节约草业研究的经费与时间，使传统的试验研究成果在更大的地理范围、更长的时间范围内推广应用；三是草业管理的数字化，即在草业生产、科研、教育、行政、流通、服务等各个环节全面地实现数字化与网络化管理，包括草业数据库系统、草业规划系统、草业专家系统、模拟优化决策系统等。这三个方面是密切联系的，没有草业要素的数字化，就不可能有信息技术的全面应用；没有信息技术的全面应用，也就不可能实现草业管理的数字化。数字草业的发展将使草业实现更高的效率、草畜产品达到更高的质量，同时，又使草地生态系统得到更有效的保护，建立可持续发展的现代草业产业技术体系。

第二节 数字草业的研究背景

食物安全与后备资源开发已成为 21 世纪我国农业发展战略与经济社会可持续发展的重大问题。长期以来，我国农业生产经营充分挖掘了农田的生产潜力，草地与海洋的巨大潜力未能得到有效发挥。我国是世界上草地资源最丰富的国家之一，拥有世界上最丰富的草地类型和牧草品种资源。我国草地面积占世界草地总面积的 12.4%，拥有各类天然草原近 398 万 km^2 （可利用面积约 300 万 km^2 ），约占国土总面积的 41%，仅次于澳大利亚，居世界第二位。对我国宝贵的草资源有序开发、合理经营，促进天然草地生态系统和草地农

在自然因素和人为因素的影响下,通过人类经营,进行着牧草生产、牲畜增殖增重和畜产品生产过程,以及草、畜产品加工流通,草地植物多种用途开发的增值过程。任继周提出,草地农业是一种特殊的农业生产系统,从生产特性来看它包括4个层次:前植物生产层(前初级生产层),如风景、旅游、绿地、水土保持等,不以收获植物或动物产品为目的,以“景观资源”表现其生产意义;植物生产层(初级生产层),以收获植物营养体、子实、纤维、脂肪、分泌物等为目的,以植物资源表现其生产意义;动物生产层,是对植物生产层的利用与转化;后生物生产层(加工贸易层),是对植物生产层、动物生产层产品的加工、流通、交换和增值(任继周,1995;任继周等,2000)。这些代表性论述,初步概括了草业的含义及内涵。

对“草业”概念的明确是草原科学发展的一次飞跃。此后,草原科学从单纯理论和应用技术研究,转向兼顾理论研究、应用技术和产业化研究的综合学科,草业和草业科学开始了一个崭新的发展阶段。1997年,教育部改定专业目录,正式将草原科学更名为草业科学;2011年,草业科学从畜牧学中独立出来,与农业、林业、畜牧业等一起构成大农业的支柱学科。草业科学是以维持草地生态系统健康和获得相关产品为目的,研究从草地资源到草地农业系统的发生与发展的科学。

21世纪以来,随着对生态系统服务与人类福祉的关注,草业具有了更加广阔的内涵。现代草业以恢复和保护受损天然草地生态系统为前提,通过改进草地质量提高草地生产力,形成以饲料牧草业、草食畜牧业、生态草业(城市草坪业和草地生态产业)为核心,兼顾生态、经济和社会效益的产业体系。

纵观草业发展,现代草业应该包括草地生态系统的自然(生态)属性和人文(农业)属性两方面内容的产业化,可以概括为以下3个子产业。

1) 草食畜牧业:以天然草地和其他草料利用经草食牲畜采食转化为畜产品进入市场为目标的产业,现代草地畜牧业是传统草地畜牧业的深化和升级,通过粮、草、畜有机结合,最大限度地生产植物产品和动物产品,有效地弥补以谷物生产为主体的传统农业生产的缺失环节,是对以农副产品为主要饲料来源的农区畜牧业的重大补充。

2) 饲料牧草业:以生产可供市场流通的饲草饲料产品为目标,其原料生产包括栽培草地、天然草地打草场、可供饲用的农林工副产品,其加工包括干草捆到颗粒、条块饲料压制,饲草铡短到氨化、微贮、青贮,以及添加剂利用和混合、配合饲料的生产。

3) 生态草业:以草地植被的景观价值或生态服务价值为目标的产业,包括抵偿碳配额的草地生态治理工程和绿色景观营造,主要有草地资源优化配置规划、水土保持建设、自然保护区建设、旅游区建设、草坪建设等。良好的生态环境是国民经济和社会长期稳定发展的基础,绿化国土、改善环境关系到中华民族的生存和长远发展。生态草业是过去涉足甚少的领域,应该将其作为草业中一个有生命力的子产业去着力开发。

二、数字草业的概念、研究对象和特点

数字草业是数字农业的一个重要分支,它在数字地球、数字农业的基本标准和规范框架下,构建面向草地生态系统现代化管理的数字技术和理论框架;集成计算机技术、网络通讯技术、空间信息技术、自动化技术与草业科学、地理学、生态学等基础学科,

蹄类食草动物与猛禽类的栖息地，也是大量优良野生牧草、药草、观赏植物与经济植物的家园，可提供发展我国食品、纺织、制革、造纸、制药、化工等轻工业以及对外出口贸易等多种经济的原材料，许多草原植物具有特殊的抗旱、耐寒、耐盐碱、高光合效率的生态生理特性，对农作物、牧草、饲料和林木的改良及育种具有很高的价值，其特殊基因资源是人类未来赖以生存和发展的珍贵基因宝库。草原是地球陆地上仅次于森林的最主要的吸收同化 CO_2 的碳汇，尤其是草地土壤腐殖质层富含有机碳，是北半球陆地生态系统的重要碳汇。我国 60 亿亩^①天然草地的年固碳总量约为 6 亿 t，对于全球生态环境具有重大意义，是我国在国际气候生态外交中举足轻重的筹码。同时草地植被是陆地最大面积的“皮肤”，防风固沙、水土保持与水源涵养作用十分显著，尤其在具有很强荒漠化潜势的半干旱地带、地势陡峭与地球重力作用强烈的山地，草地植被的屏障功能就格外重要，如草原退化引发的沙尘灾害近年来成为一个跨地区、跨国界的环境问题。

但由于 20 世纪下半叶草地粗放经营和掠夺式利用，我国天然草地生态退化达 90% 以上，很大程度上已成为沙尘暴、水土流失与自然灾害的渊藪，碳储量随草地生产力降低、土壤退化而大大降低。沙尘暴、荒漠化、水土流失等生态环境问题，对牧民的生产生活造成了极大影响，直接危及牧区经济社会可持续发展和国家生态安全。草地已不能满足人类社会对其生产力与生态功能极大增长的需求，从而成为我国西部牧区建设全面小康社会的瓶颈。党中央、国务院高度重视草原保护建设工作，“十五”以来实施了一系列草原保护建设政策与工程，包括退牧还草工程、天然草原保护工程、京津风沙源治理工程及草原生态保护补助奖励机制。退牧还草工程从 2003 年开始实施，截至 2012 年年底，中央财政累计在西藏、内蒙古、新疆、青海、四川、甘肃、宁夏、云南和新疆生产建设兵团等项目区投入资金 175.7 亿元。2010 年，国务院通过的《草原生态保护补助奖励机制》，每年投入 136 亿，促进草地生态恢复、畜牧业发展方式转变和牧民增收。

但是，由于草地生产和生态状况信息难以准确、实时获取，草地生产过程缺乏科学管理和动态调控，草地生产过程和保护建设工程缺乏技术支撑，草地退化形势仍相当严峻。同时，目前我国草业开始由原始生产方式向现代工程建设方式、高强度人工种草发展模式转变，规模化草业处于起步阶段，生产管理中的科技引导对行业发展具有决定性意义。数字草业能够建立从信息采集、动态监测、管理决策到信息传播的技术体系，丰富翔实的基础数据库及数字化决策管理服务系统为草地生产管理优化决策提供科学支撑，对于建立我国现代草业产业技术体系，促进农牧业信息化、科学化和现代化具有重要作用。

国际上，数字草业技术已经发展到较高水平，且在实际生产中得到应用。20 世纪中叶以来，随着计算机技术、对地观测技术的发展和运用，欧美发达国家在建立现代草业生产体系的同时，也发展了完善的草地生产监测与数字化管理系统，大大提高了草地经营管理的水平和效率。目前，国际草地数字化管理技术进入以网络化、空间化、智能控制为主的全面信息化阶段，数据信息越来越系统、数字化产品越来越实用。

我国数字草业技术研究尚处于肇始阶段，我国 20 世纪 80 年代以来也开展了草业数字化监测、管理与决策支持研究与应用，但由于技术条件和基础数据等限制，一直没有建立起完整、实用、服务于草地生态和草业生产的数字化监测管理平台和技术体系。与

① 1 亩 $\approx 666.7\text{m}^2$