

Simulation and
Regulation of
Agricultural Land
Use Systems

农业土地利用系统 模拟与调控

刘黎明 袁承程 李洪庆 周 德 起晓星 著



中国农业大学出版社

CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY PRESS

农业土地利用系统模拟与调控

刘黎明 袁承程 李洪庆 周 德 起晓星 著

中国农业大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

该书为国家自然科学基金重点项目“高集约化农区土地利用系统过程模拟及其环境风险控制”的研究成果。全书详细阐述了农业土地利用系统的基本特征、过程、效应及其调控机制,并针对高集约化农区不合理的土地利用活动所导致的高环境风险问题,从土地利用系统角度,引入物质流分析原理,开展不同尺度农业土地利用系统过程解析和定量模拟,探析从区域—小流域(景观)—农户经营单元尺度的污染物累积机制和环境风险控制途径。

图书在版编目(CIP)数据

农业土地利用系统模拟与调控 / 刘黎明等著. —北京:中国农业大学出版社,2018.9

ISBN 978-7-5655-2085-3

I. ①农… II. ①刘… III. ①农业用地-土地利用-系统仿真-研究-中国
IV. ①F321.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 177174 号

书 名 农业土地利用系统模拟与调控

作 者 刘黎明 袁承程 李洪庆 周 德 起晓星 著

策 划 孙 勇

责任编辑 孙 勇

封面设计 郑 川

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号

邮政编码 100193

电 话 发行部 010-62818525,8625

读者服务部 010-62732336

编辑部 010-62732617,2618

出 版 部 010-62733440

网 址 <http://www.caupress.cn>

E-mail cbsszs@cau.edu.cn

经 销 新华书店

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

版 次 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

规 格 787×1 092 16 开本 12.5 印张 310 千字 彩插 8

定 价 68.00 元

图书如有质量问题本社发行部负责调换

前 言

20世纪90年代以来,我国普遍实行了高投入的农业生产模式,通过不断提高土地集约利用程度、增加化肥农药等投入,实现高产增收,在一定程度上缓解了我国人口增长与耕地资源不断减少的矛盾。然而,这种高投入和高强度的集约化土地利用模式的资源损耗代价和环境风险十分突出。如何协调粮食安全保障与生态环境保护之间的关系,实现农业和农村的可持续发展,已成为当前中国农业发展过程中面临的一个严峻挑战。在这个国家重大战略需求的背景下,我们申请了国家自然科学基金重点项目“高集约化农区土地利用系统过程模拟及其环境风险控制”(批准号41130526),试图从农业土地利用系统的视角,来辨析土地投入和产出、粮食安全与生态环境之间的复杂关系,揭示高集约化农区土地利用环境风险的关键控制环节,研究探索投入减量化和低环境风险的可持续土地利用模式。

《农业土地利用系统模拟与调控》一书,是由该重点基金项目部分研究成果整理而成,全书共9章,主要包含以下核心内容:①基于人地关系理论和系统分析方法,完整地阐述了农业土地利用系统的基本特征、过程、效应及其调控机制;②根据农业土地利用系统的尺度特征,以农户经营单元—小流域—区域三种不同管理尺度为主线,构建了一套从农户管理单元尺度,到小流域尺度,进而上升到整个区域尺度的农业土地利用系统定量模拟方法体系,实现了分析和模拟不同管理尺度的农业土地利用系统变化对粮食生产和生态环境影响的目标;③探讨了基于粮食安全与环境风险控制目标的可持续农业土地利用系统调控方法,从农业景观格局优化、农户土地利用行为决策、农业和土地政策调控等不同层面,探索了投入减量化和低环境风险的可持续土地利用模式,可为高集约化农区的生态环境质量提升和农业可持续发展提供科学依据。

本著作是由所有参与这项国家自然科学基金重点项目研究的师生们共同努力所取得的成果。在此,特别感谢上海大学胡雪峰教授、中国农业大学孙丹峰教授和芮玉奎副教授、日本埼玉环境科学国际中心王劲举教授对重点项目方案的形成、实施和圆满验收所做出的重要贡献。在项目实施期间,先后有20几位硕博研究生参加了这项研究工作,共发表了将近60篇高水平学术论文。其中,由笔者指导的研究生有周德、李洪庆、起晓星、付永虎、刘朝旭、殷冠羿、邱孟龙、袁承程、卓东、常笑、赵鑫、邝琴霞、刘升蛟、马聪、叶津炜、杜荪玲、郭赞、王加升等同学。尤其是在论著编写过程中,袁承程、李洪庆、周德、起晓星等博士们承担了主要章节的撰写,付出了更多艰辛努力。袁承程博士在项目的后期总结、结题验收和论著整理编写过程中做出了不可替代的重要贡献。

农业土地利用是一个广受关注的研究议题,不同领域的学者都会有各自的认识和观点。本书主要以农业土地利用、系统模拟与调控以及综合风险管理三者交叉融合为脉络,试图更加全面和系统地阐明农业土地利用系统的基本原理和理论框架,并将其应用于不同尺度上的农业土地利用系统模拟与调控实践,希望能够为那些致力于解决土地利用与生态环境问题的研究人员和管理者提供一个新的视角和方法。

作者

2018年1月

目 录

第1章 农业土地利用系统概述	1
1.1 农业土地利用系统的基本内涵及其特征	1
1.1.1 农业土地利用系统的基本内涵	1
1.1.2 农业土地利用系统的基本特征	2
1.2 农业土地利用系统的概念框架	4
1.3 农业土地利用系统的过程分析	5
1.3.1 生物过程	5
1.3.2 农户决策过程	6
1.3.3 土地利用变化过程	6
1.3.4 物质流过程模拟	7
1.3.5 过程耦合与集成	9
1.4 农业土地利用系统的模拟	9
1.4.1 农户经营单元尺度	10
1.4.2 小流域尺度	10
1.4.3 区域尺度	11
1.5 农业土地利用系统的调控	12
1.6 小结	12
第2章 农户经营单元的农业土地利用系统模拟与调控研究	14
2.1 研究区概况及数据来源	14
2.1.1 研究区概况	14
2.1.2 数据来源	15
2.2 农户土地利用行为解析	16
2.2.1 农户类型研究	16
2.2.2 农户行为特征分析	16
2.2.3 农户决策行为影响因素分析	18
2.3 农户土地利用决策行为模拟	20
2.3.1 基于线性规划模型的农户土地利用决策行为模拟	21
2.3.2 不同农户类型的粮食产量回归模拟	22
2.4 基于耕作单元的农业土地利用环境效应研究	23

2.4.1	基于耕作单元的农业土地利用系统物质流分析框架	23
2.4.2	物质流分析核算方法	24
2.5	不同农户类型的农业土地利用综合效应评价	25
2.5.1	农业土地利用效应评价指标体系的构建	25
2.5.2	指标权重的确定	27
2.5.3	农业土地利用综合效应的计算	27
2.5.4	结果分析	28
2.6	农户土地利用行为调控	30
第3章	小流域尺度的农业土地利用系统模拟研究	31
3.1	研究区概况及数据来源	31
3.1.1	研究区概况	31
3.1.2	数据来源	31
3.1.3	流域基本特征分析	32
3.2	ABM与IECM耦合模型的构建	34
3.2.1	ABM与IECM耦合模型的框架	34
3.2.2	ABM模型的构建	36
3.2.3	IECM模型	39
3.2.4	ABM和IECM模型的数据交互过程	40
3.2.5	ABM-IECM耦合模型的模拟	40
3.2.6	ABM-IECM耦合模型的验证	41
3.3	ABM与IECM耦合模型的模拟结果分析	42
3.3.1	农户类型的变化	42
3.3.2	作物种植制度、常住人口以及生猪数量的变化	43
3.3.3	总氮输出的变化	44
3.4	讨论与总结	46
3.4.1	讨论	46
3.4.2	总结	48
第4章	乡镇尺度的农业土地利用系统模拟研究	49
4.1	研究区概况及数据来源	49
4.2	ABM与SFA耦合模型的框架	50
4.3	ABM与SFA耦合模型的构建	51
4.3.1	ABM模型的构建	51
4.3.2	SFA模型的构建	54
4.3.3	ABM-SFA耦合模型的验证	55
4.4	模拟结果分析	56
4.4.1	作物种植制度及粮食产量变化	56

4.4.2	氮素环境输出变化	57
4.4.3	氮盈余变化	59
4.5	讨论与总结	60
4.5.1	讨论	60
4.5.2	总结	61
第5章	基于不同政策情景的农业土地利用系统调控研究	62
5.1	不同情景设置	62
5.2	不同政策情景模拟结果	63
5.2.1	农户类型分析	63
5.2.2	种植制度变化	64
5.2.3	水稻总产变化	66
5.2.4	化肥和农药的投入变化	67
5.2.5	氮素环境变化	68
5.3	农业土地利用系统的调控政策选择	71
5.3.1	政策情景分析	71
5.3.2	政策启示	71
5.4	小结	72
第6章	基于景观情景模拟的农业土地利用系统设计	73
6.1	研究区概况及数据来源	73
6.1.1	研究区概况	73
6.1.2	数据来源	74
6.2	金井小流域景观格局分析	75
6.2.1	金井小流域景观格局特征	75
6.2.2	河流缓冲区景观格局分析	76
6.3	金井小流域水体污染物输出特征分析	77
6.3.1	污染物输出时间尺度分析	77
6.3.2	污染物浓度空间尺度分析	78
6.4	农业景观格局与水环境质量关系模拟	80
6.4.1	空间尺度选取	80
6.4.2	景观类型选取	81
6.4.3	景观格局指数选取	82
6.4.4	景观格局与污染物浓度关系模拟	82
6.5	基于标准景观情景方法的农业景观情景模拟	83
6.5.1	标准景观情景方法概述	83
6.5.2	农业景观未来情景设计内容	85
6.5.3	情景Ⅰ:以提高农产品产量为首要目标	90

6.5.4	情景Ⅱ:以提升水环境质量为首要目标	92
6.5.5	情景Ⅲ:以新型城镇化建设为首要目标	95
6.6	不同景观情景土地利用效应评价	96
6.6.1	景观格局分析	96
6.6.2	水环境质量评价	98
6.6.3	经济效益评价	101
6.6.4	生物多样性评价	104
6.6.5	农户意愿分析	105
6.7	小结	107
第7章	基于粮食供给安全和环境风险控制目标的可持续农业土地利用模式选择	108
7.1	桃江县土地利用现状及数据来源	108
7.1.1	桃江县土地利用现状	108
7.1.2	数据来源	109
7.2	桃江县粮食需求及粮食生产过程中的风险分析	110
7.2.1	桃江县粮食需求分析	110
7.2.2	桃江县粮食生产过程中的风险分析	111
7.3	农户土地利用决策行为及粮食生产效益分析	113
7.4	桃江县耕地生产力评价	116
7.5	不同粮食生产情景效益评价及可持续土地利用模式选择	121
7.5.1	桃江县粮食生产背景及评价情景设定	121
7.5.2	不同粮食生产情景的综合效益分析	121
7.5.3	可持续农业土地利用模式选择	122
第8章	区域尺度的盐渍化土壤景观时空动态模拟研究	124
8.1	研究区域概况与数据来源	124
8.1.1	研究区域概况	124
8.1.2	数据来源及遥感制图	126
8.2	盐渍化土壤景观格局分析	128
8.2.1	银川平原灌区盐渍化土壤景观数量结构动态变化	128
8.2.2	银川平原灌区盐渍化土壤景观格局时空变异特征研究	132
8.2.3	盐渍化土壤景观“格局—过程”分析	133
8.3	盐渍化土壤景观时空动态模拟模型构建	137
8.3.1	CA-Markov模型在土地利用与景观空间格局模拟的应用	137
8.3.2	基于CA-Markov模型的盐渍化土壤景观时空动态模拟	138
8.4	基于CA-Markov模型的盐渍化土壤景观动态模拟及预测	142

8.4.1 CA-Markov 模型检验及比较	142
8.4.2 盐渍化土壤景观类型预测	144
8.4.3 CA-Markov 模型应用效果讨论	145
8.5 小结	147
第9章 基于土地利用系统控制的区域土壤盐渍化风险防控	148
9.1 基于 PSR 框架的土壤盐渍化风险综合评价	148
9.1.1 土壤盐渍化风险综合评价的理论与方法	148
9.1.2 土壤盐渍化“因—果”关系分析	149
9.1.3 基于 PSR 框架的土壤盐渍化风险评价指标体系构建	150
9.1.4 土壤盐渍化风险综合指数评价模型	153
9.1.5 土壤盐渍化风险综合评价结果与分析	157
9.2 基于 SAR 模型的土壤盐渍化风险防控模型	160
9.2.1 基本思路和研究方法	160
9.2.2 土壤盐渍化关键风险因子筛选	163
9.2.3 结果与分析	164
9.3 基于土地利用系统控制的土壤盐渍化风险调控 策略和措施	167
9.3.1 盐渍化土地利用系统风险调控的内涵与目标	167
9.3.2 构建绿洲土壤盐渍化风险防控体系及优化方案	168
9.3.3 结果与讨论	170
9.4 小结	172
参考文献	173

第1章 农业土地利用系统概述

农业土地利用是人类为了自身的生存和发展需求而有计划地对土地资源进行开发、利用和经营的活动,是人地关系的纽带和桥梁,同时也是土地利用系统最为重要的组成部分(唐华俊,等,2015)。农业土地利用系统对人类的生存和发展至关重要:一方面,农用地作为全球面积最大的土地利用类型,它生产的大量农产品直接关乎人类粮食安全;另一方面,农用地作为一种空间连续的社会经济和自然综合体,其状态与功能随时间的变化而变化,驱动区域乃至全球生态环境的变化。因此,如何科学合理地利用农用地是农业土地利用可持续发展中亟须认真对待并加以解决的重大课题,同时也是地理学、生态学等领域的前沿和热点研究方向之一(Foley, et al., 2011)。本章在对农业土地利用系统的定义和特征进行解析的基础上,通过构建农业土地利用系统概念框架,明确农业土地利用系统的组成部分,并从农户经营单元尺度、小流域尺度以及区域尺度对农业土地利用系统定量模拟的目标和内容进行了概述。

1.1 农业土地利用系统的基本内涵及其特征

1.1.1 农业土地利用系统的基本内涵

系统是由相互作用、相互依赖、相互制约的若干部分结合而成的具有特定功能的有机整体。从系统科学理论来看,土地本身就是由土壤、气候、水文、地质、生物等要素组成的陆地表层生态系统,具有一定结构和功能,是一个与外界不断进行物质、能量、信息交换的开放系统。土地利用则是人类为了从土地上获取物质或精神的需要,对土地实施永久或周期性的干预活动,是由土地质量特性和人类社会需求协调一致所决定和发挥土地功能与作用的过程。因此,土地利用系统是一个由自然因素和社会经济因素交互作用的复杂系统,既受到人类社会需求的驱动,也受到自然环境要素的约束,两者相互影响、相互制约,形成具有地域空间特征的自然生态经济耦合系统。

综上所述,农业土地利用系统是指在一定的自然和社会经济条件下,农业各部门或各种作物的生产要素按各种比例、采用不同方式结合而成的人与自然耦合系统(付永虎,2016;刘黎明,2010),它是以土地为核心载体的农业系统与土地系统的结合部分。农业土地利用系统的过程包括环境输入、生产要素输入、土地利用活动以及各种输出;农业土地利用系统的功能是以保障人类生计与粮食安全,促进人类可持续发展为核心;农业土地利用系统的特征以土地权属、作物布局、集约程度等为具体表象。农业土地利用系统由于受到自然、社会、经济等驱动因子变化的影响,其结构、过程和功能均会发生变化。结构变化主要包括农业土地数量、土地利用结构以及空间布局等状态的变化。过程变化包括农业土地利用系统的物质流、能量流、价值流和信息流的不断变化。功能变化主要表现在随着人类社会发展和需求改变农业土地利用的目的逐渐由单一功能向多功能方向演变。因此,农业土地利用系统的研究内容应当包括系统

组成结构和时空格局演变、土地利用过程模拟以及综合效应分析等 3 个方面,它是以农业土地利用系统的组成结构和时空格局演变分析为重要基础,以多模型耦合的过程与机制解析为核心内容,以综合效应评估与调控为关键任务。

1.1.2 农业土地利用系统的基本特征

从农业土地利用系统的定义可知,农业土地利用系统研究具有以下 3 个基本特征:

(1)多学科 农业土地利用系统是农业系统、土地系统以及社会经济系统等复杂系统所组成的一个结合体(余强毅,2013)。因此,农业土地利用系统的研究离不开诸如农学、土壤学、气象学、土地管理等学科知识的支持,如图 1-1 所示。例如,研究农作物的生长需要作物学、土壤学、植物营养学以及气象学等学科的支持;而对农业土地利用系统结构和空间格局变化的研究,又需要地理学、土地资源学、土壤地理学、遥感等学科的知识;同时,由于农业土地利用的主要目的是为了 满足人类生存和发展的粮食需求,因而在研究农业土地利用系统时又须借助社会经济领域相关学科的理论 与知识。只有在多学科领域紧密联系的基础上,才能对农业土地利用系统 进行全面的解析,了解其基本运行规律,识别其关键问题,从而修正人类不 合理行为,控制其环境风险,实现农业土地可持续利用的目标。

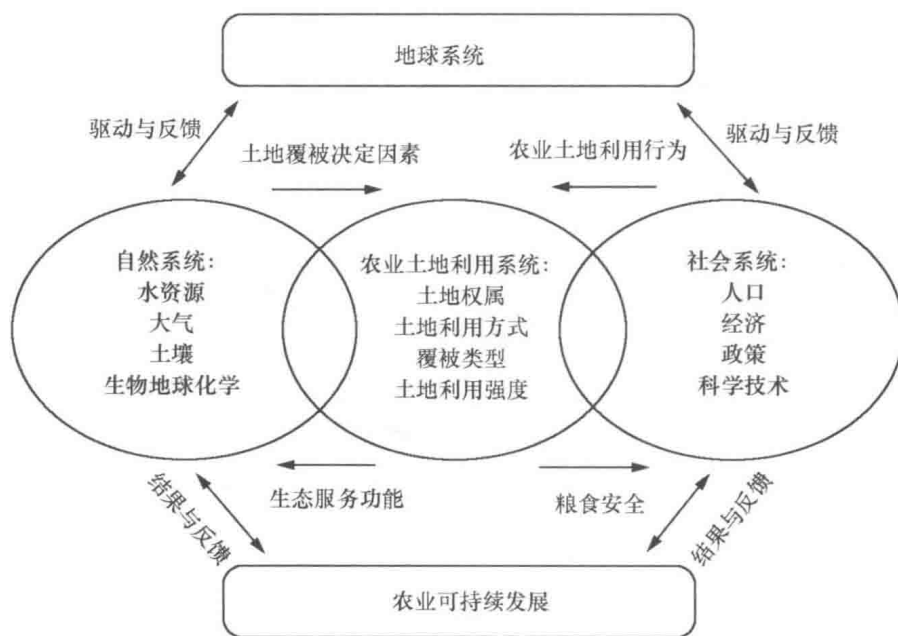


图 1-1 农业土地利用系统及其与其他学科领域的关系(改自唐华俊, 2015)

(2)多尺度 尺度是人们观察地理现象的窗口,所有的地理实体都是在特定的尺度范围内被观察和测量。因而,尺度不同,对地理现象的抽象和表达也会存在着显著差异(柯新利等, 2010)。作为地球系统和社会经济系统的有机组成部分,农业土地利用系统同样遵循着地理科学的基本定律——尺度特征。如仅考虑耕作和种植制度,一个土地单元和一个土地利用类型相结合构成一个农户经营单元尺度的农业土地利用系统;而在一个农业区域,土地组合的类型较多,利用方式也较多,甚至同一块土地类型的范围内,或同一块土地类型上的不同部位也会形成相异的土地利用类型,从而形成复合土地利用系统;在单一或复合土地利用系统的轮作

下,构成区域农业土地利用大系统(付永虎,2016)。农业土地利用系统的等级组织及其复杂性,使之具有高度空间异质性,例如,在农业土地利用的格局、过程、驱动力和效应分析,以及土地利用系统管理和重建等方面,均表现出显著的多尺度特征。根据相关研究,尺度又可依据缩放的方式,分为横向尺度(Horizontal scale)和纵向尺度(Vertical scale);横向尺度是指依据比例尺或分辨率定量的放大或缩小;而纵向尺度是强调的是管理方式和政策制度的变化,例如田块(耕作单元)尺度、农户管理单元尺度、小流域管理尺度以及区域管理尺度等(FAO,2007)。因此,本研究依据纵向尺度,把农业土地利用系统主要分为农户管理单元尺度、小流域管理尺度以及区域管理尺度(图 1-2)。一般而言,小尺度上主要涉及具体技术问题,中尺度上会涉及利用方式和布局问题,大尺度上则还需要考虑战略和政策问题,而所有这些问题又是互相影响的(蔡运龙,2001)。因此,在耕作单元和农户管理单元尺度,本文主要研究农户决策过程和农业土地利用过程等具体技术问题;在小流域管理尺度,主要研究农业土地利用的空间布局对环境效应的影响;而在区域管理尺度,主要研究政策对农业土地可持续利用的影响。

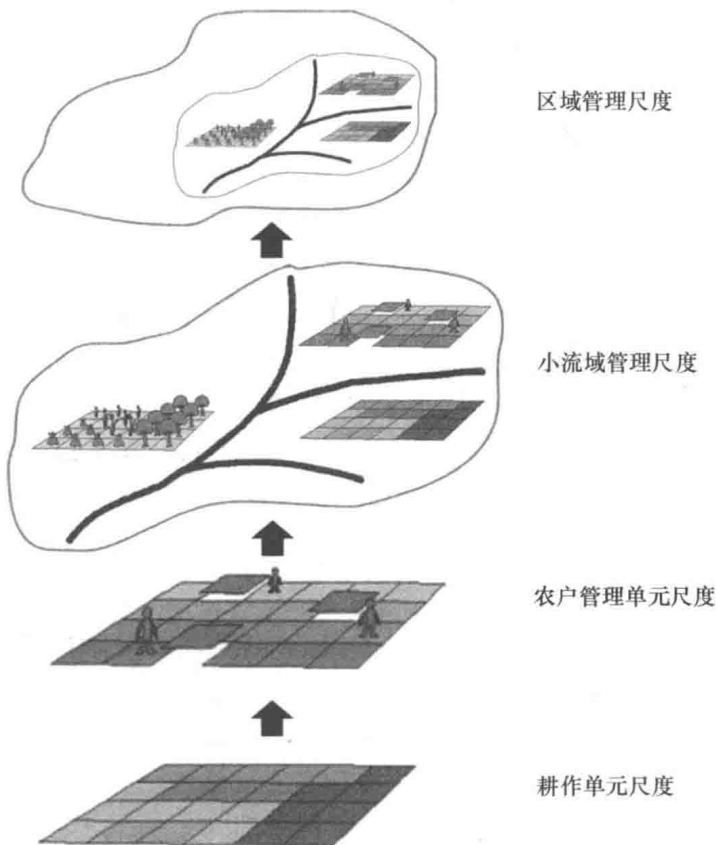


图 1-2 不同管理尺度的农业土地利用系统

(3)多效应 农业土地利用系统的多效应性,主要体现在:首先,农业土地利用系统具有社会经济效应。自人类社会出现以来就持续不断从耕地中获取食物供给,耕地面积的扩展、土地利用集约度的提高、农作物单产的提升和空间布局与种植结构的调整等,这些对于保障区域或国家粮食安全、促进农业增长、农村稳定和农民增收等均发挥了重要作用(Brouwer, et al., 2013;Smith and Sullivan,2014)。其次,农业土地利用系统具有环境效应。例如,人类在从农

业土地获取食物供给的同时,因农用化学物质的过量投入,不仅会危害人类自身健康,又会产生诸如水质恶化、土壤板结、气候变化等严重的环境问题。农业土地利用系统还具有生态效应。农业土地利用系统的变化会改变地表覆盖和利用强度状况,影响地球表面的物理特征和生物地球化学循环过程,进而影响地表与大气之间的能量、水分和元素的交换过程,以及土壤—植被之间的营养物质输送过程,从而改变土地生态系统的结构与功能,导致其产生不同的生态效应,如生态服务价值、生物多样性和景观破碎化程度的变化(Chazal, 2009; Hayha, 2014; Metzger, et al., 2006)。

1.2 农业土地利用系统的概念框架

经过对农业土地利用系统的解析,在参考已有研究的基础上(刘黎明,2010),本研究构建了农业土地利用系统概念框架,如图 1-3 所示。依据该框架,农业土地利用系统主要由输入、土地利用过程、输出以及反馈与控制 4 个部分组成:①农业土地利用系统输入分为生产输入和环境输入,其中生产输入包括了各种物质资料(如化肥、农药、种子、畜禽粪肥、灌溉用水等)、资金、劳力、机械和技术等投入,而环境输入主要包括环境自然要素(如光照、温度、水分等)以及其他污染物(如重金属)的输入。②土地利用过程主要包括生物过程、农户决策过程、土地利用变化过程以及物质流动过程,其中物质流动过程又可分农田养分循环过程,水文过程以及物质流分析等。通过农业土地利用过程,农业土地利用系统的生产输入和环境输入进入系统中并产生系统输出。③农业土地利用系统输出分为产品输出和环境输出,其中产品输出分为农产品(如稻谷、小麦和玉米等粮食产品)和农副产品(如秸秆等);而环境输出主要是指经由地表径流、地下淋溶、挥发以及反硝化等途径输出的各种物质(如氮磷营养物质、温室气体、农药残留

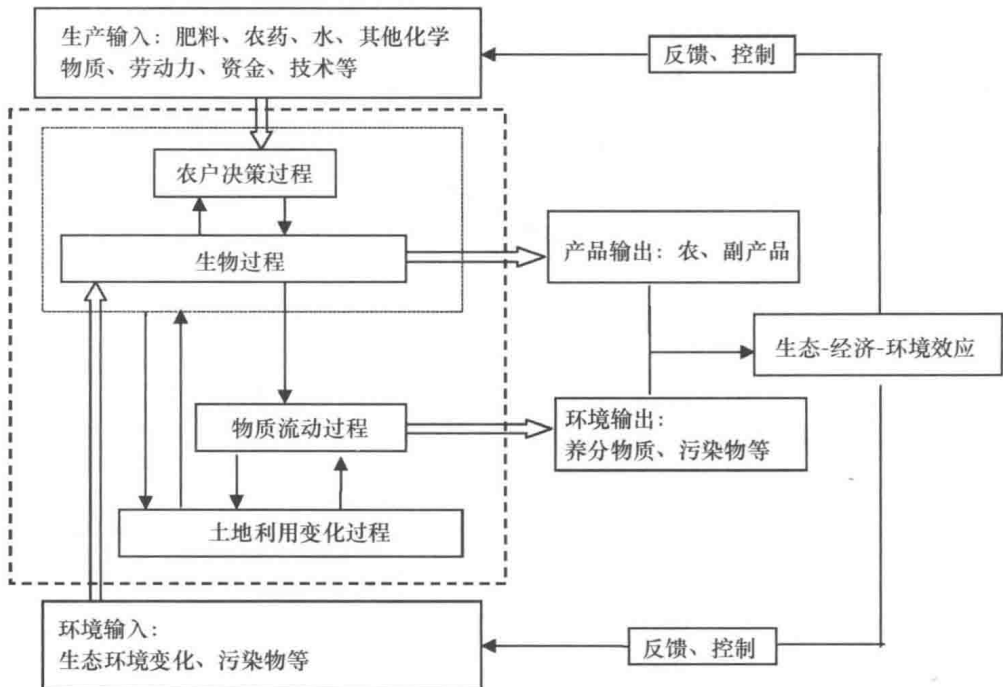


图 1-3 农业土地利用系统概念框架

等)。④农业土地利用系统主要包括了两个反馈与调控路径:其一,是由生物过程产出的粮食产量,与社会、经济、政策等因素结合之后,又通过农户决策行为输入到农业土地利用系统中所构成的反馈路径;其二,是由环境输出的污染物质,经过政策和工程技术手段干预后又通过环境输入到农业土地利用系统中所组成的反馈路径。

1.3 农业土地利用系统的过程分析

根据农业土地利用系统框架,农业土地利用过程是农业土地利用系统研究的核心部分。它主要包括生物过程、农户决策过程、土地利用变化过程以及物质流动过程,其中物质流动过程又可分农田养分循环过程,水文过程以及物质流分析等。

1.3.1 生物过程

生物过程是指生物生长、发育、产量形成等过程及其与环境交互的过程。目前,在农业土地利用系统中,主要是通过构建生物过程模型定量描述生物生长、发育、产量形成等过程及其与环境的关系。生物过程模型按照模拟对象的不同,可分为作物生长模型和畜禽动物生长模型。根据模型的输出特点,作物生长模型又分为两类:一类是专注于模拟作物产出的模型,如WOFOST、SWAP和ORYZA等模型(王涛等,2010;冯绍元等,2014;莫志鸿等,2011),该类模型以光合作用为基础,通过改变作物参数便可应用于不同作物,主要用于验证科学假设和率定作物模型以及评价不同管理措施对作物产量的影响;另一类是既可模拟作物生长又能模拟环境输出的综合作物生长模型,此类模型把作物生长模块与氮磷物质循环模块进行了耦合,如DSSAT、APSIM、EPIC等模型(Vogeler, et al., 2013; 刘建刚,等,2013; 张均华,等,2012)。它们不仅可以模拟气候变化或管理措施对作物产量的影响,为合理有效地利用农业和自然资源提供决策支持(Dono, et al., 2013; Ritchie, 1995; Yang, et al., 2014; 杜建涛等,2008),还可用于模拟土壤碳氮循环(Luo, et al., 2014; Vogeler, et al., 2013),评价养分循环与损失(Bandaru, et al., 2013; Bash, et al., 2013)和水土流失(Gaiser, et al., 2008)等方面。而畜禽养殖作为农业土地利用系统的重要组成部分,畜禽动物生长模型的模拟对于分析农户经济效益与环境效应具有重要作用,但是,因牵涉的学科领域太广,涉及因素众多,且各因素间的相互作用关系过于复杂,目前应用于动物生产实践的模型很少。

农业土地利用系统中的生物过程模型在模拟农事活动、预测其经济产量和环境输出等方面具有重要作用,其目的是实现定时、定位、定量地开展农业生产技术管理,以达到高产出、低投入、低环境风险的目标。然而,现有的生物过程模型还有待进一步发展:①动物生长模型研究还需加强。在我国农业土地利用系统中,养殖业对农户的决策行为及其环境效应具有非常重要影响。而现有的模型大部分是通过系数法测算动物产量和环境输出,其准确性有待提高。②作物生长过程模型通用性与参数检验问题。作物生长过程模型是农业土地利用系统的基础。为了便于与其他模型耦合,其模拟的作物类型不仅仅是一种或两种作物,而是能模拟一个区域内主要的农作物生长。假若作物模型不通用,参数需要多,会耗费大量的人力物力。③应与3S技术、专家系统、决策支持系统、网络技术、天气发生器等高新技术或其他领域模型进一步结合。此外,模型界面友好,便于操作,才能使模型为农业生产者和管理者所应用。

1.3.2 农户决策过程

农户是以血缘和婚姻关系为基础而组成的农村家庭。它是农村经济活动的行为主体,也是农业生产中最基本的决策单元,同时也是政策和市场因素的直接受体。土地权属的流转、作物布局的变化、作物种植方式的改变等都直接与农户的行为相关。因此,对农户的决策过程的研究具有重要意义。目前,农户决策过程研究主要是通过构建农户决策模型来定量描述农户的土地利用行为,其代表性的模型,如线性规划模型和基于 Agent 的决策模型等(李芹,等,2014)。线性规划模型是在一组生产限制条件下最优化农户的目标效用的方法(刘莹,黄季焜,2010)。如吴连翠(2011)基于线性规划法,通过构建农户模型来模拟粮食补贴政策的绩效(吴连翠,陆文聪,2011)。线性规划方法主要通过构建数学函数来求解,应用相对简单,但是对农户的意愿考虑略有不足。故又有学者提出基于 Agent 的模型来研究农户决策行为。基于 Agent 的决策模型是通过建立农户决策规则,以实现农户决策行为的模拟(常笑,等,2013;余强毅,等,2013)。该方法能较好地解释农户决策的机理,但是该模型的构建过程相对复杂。

1.3.3 土地利用变化过程

土地利用变化过程旨在研究社会经济发展或气候变化对土地利用变化的影响。根据土地利用变化模型构建的原理,又可分为 3 类:一是基于经验统计的方法,如 CLUE-S。CLUE-S 模型是将自然驱动与人文驱动因子、空间分析与非空间分析、基于经验统计模型与基于过程模型相结合,全面描述社会、经济、环境和制度因素对土地利用变化的影响。CLUE-S 优点是具有较好的综合性、更好的开放性,更明晰的空间性以及较高的效率(吴健生等,2012),可很好地模拟土地利用变化的生态环境效应(Dams, et al., 2008; Zhou, et al., 2013; Zhang, et al., 2013),以及对不同政策的响应(Banse, et al., 2011; Britz, et al., 2011)。

二是基于栅格邻域关系分析的方法,如元胞自动机(Cellular Automata, CA)。CA 模型是一种时间、空间状态均离散,相互作用及因果关系皆为局部的网格动力学模型;CA 模型优点是可模拟复杂系统行为,实现系统未来发展状况的情景分析,能够可视化地模拟土地利用的时空动态过程等,例如:Zhou(2012)、王友生(2011)等通过应用 CA 与 Markov 模型耦合来研究区域土地利用/景观变化。CA 模型的缺点是参数有较大的不确定性,无法有效地将具体的政策影响容纳到模型之中。

三是基于多智能主体分析的方法,如 Agent-based model(ABM)。ABM 模型主要是通过模拟微观主体结构变化(如人口增长、迁徙等)或决策行为变化(如生计选择、土地配置、权属变更、农作物选择),并表达这些变化过程对宏观层面土地利用方式与格局的影响(余强毅等,2013)。例如 Valbuena 等(2010)通过构建 ABM 模型来模拟区域尺度土地利用变化,并以荷兰的一个案例区进行了研究。ABM 模型的优点是建立模型灵活,注重模拟人类决策行为,以及能够表达宏观与微观之间相互反馈作用关系等。此外,作为由下至上的模型,ABM 模型还可非常容易地与其他模型模块进行耦合,以研究土地利用系统的变化及其所带来的经济—社会—生态综合效应。但是,目前 ABM 也存在空间表达困难、模型检验和验证研究不足等问题。

以上 3 种模型是现有模拟土地利用变化过程最常见和应用最广泛的方法。它们在模拟农业土地利用系统变化,帮助人类了解其变化机制起到了重要作用。但是,现有模型侧重于土地

利用类型变化,如耕地、建设用地、林地等之间的转化,对耕地内部农作物空间格局动态变化研究不足。而实现对农作物空间格局动态变化的模拟具有重要意义:一方面,农作物布局和种植方式的变化会显著影响这一区域的生物多样性与农田碳氮循环过程;另一方面,农作物时空格局变化与农田碳氮循环过程又会共同作用于粮食生产,从而影响区域粮食安全状况。此外,现有研究多侧重于土地自然属性的变化,缺少对土地权属等社会属性变化的研究。因土地权属的变化必然会导致其农业投入的变化,如张丽君等(2005)研究结果表明,农村农地流转行为很大程度上改变了农村土地利用结构、土地利用方式以及土地利用强度。因此,如何模拟农业土地系统中土地权属和作物布局的变化是今后重点研究方向之一。

1.3.4 物质流过程模拟

农业土地利用的过程也是物质在农业土地利用系统内的迁移与转化的过程。在定量模拟农业土地利用变化过程中,依据研究尺度的不同,其物质流动过程的模拟分析方法又可分为农田营养物质循环模型、流域水文过程模型及区域物质流分析模型。

1. 农田营养物质循环模型

目前,关于农田氮循环模型的研究有许多。根据模型建立方法的不同,氮循环模型可分为经验模型和机理模型。经验模型通常依据实验测定或调查的环境变量间的数据关系,采用统计方法,通过曲线拟合建立方程,以此进行外推,如 Shaffer 等(1987)建立的氮素循环模型 NTRM。经验模型所需的参数较少,使用比较方便,应用较为广泛,却不能准确地反映土壤氮素的长期动态变化,有较强的地域性(唐国勇等,2005)。而机理模型则从氮循环机理着手,研究环境因子对氮循环过程的影响机制,如 DNDC 模型、CERES 的子模型以及 EPIC 的子模型等(张均华等,2012; 刘建刚等,2013;)。该类机理模型理论性强,延展性好,可用于模拟不同地区土壤氮素长期动态变化,如 DNDC 已被许多学者应用在不同的地区(Cui, et al., 2014; Goglio, et al., 2014),但该模型运行所需参数较多,建模者需对整个氮循环过程都有深入研究。与氮循环研究相比,磷循环的研究目前还很薄弱。之前,磷循环研究主要集中在作物吸磷的机理方面,缺少磷循环的动态模拟研究。近些年,一些学者尝试对磷循环进行动态模拟,并取得了一定的成果,如庄恒扬等(2005)建立了土壤磷动态及作物吸收利用的模拟模型。此外,一些作物生长模型也开始通过构建磷的子模型来模拟磷的运转和迁移,如李军等(2005)介绍了 EPIC 中土壤磷运转和作物营养的数学模拟。但是,磷的动态模拟研究还是不足,在许多已研制的诸如 CERES、ORYZA、WCSODS 等综合性作物生长模型中都还缺少磷素循环模块的研究(张均华等,2012)。

2. 流域水文过程模型

水文过程模型主要目的是模拟在重力因素的影响下,流域内物质在各类土地利用类型中迁移与转化的过程,其模拟结果对于识别流域内农业土地利用系统关键污染源,评价区域土地利用管理措施和工程措施对水文水质的影响等方面具有重要作用。目前,在水文过程模型研究中,应用较多的主要是非点源污染模型。根据模型的构建途径和过程,非点源污染模型通常又可分为经验模型、机理模型和功能模型 3 类。一类是经验模型,它是指利用污染物输出系数估算流域面源污染负荷,是一种集总式简便面源污染负荷估算方法(Johnes, 1996),如输出系数模型。输出系数模型通过应用黑箱原理,有效地避开了非点源污染发生的复杂过程。该方