

前 言

生态系统、人类活动和气候变化之间存在着错综复杂的关系，土地利用与土地覆盖变化是连接三者的关键和核心，要解决土地利用与土地覆盖变化这样复杂的全球变化问题，必须综合考虑自然及社会经济等相关学科的科学见解，利用综合评估工具对其进行系统的“综合评估”是必然选择。本书基于气候变化的视角，利用气候变化综合评估模型之一的 GCAM (global change assessment model) 在气候变化综合评估框架下，探讨气候政策情景下中国未来 100 年土地利用变化的数量和空间分布特征，模拟预测特定土地利用类型生物能源的生产供应及未来的数量变化和空间分布格局，并就生物能源发展对农业经济、能源消费和土地利用结构的影响进行反馈，进一步探索应对气候变化的最优化配置的土地利用格局，为国家及区域在应对气候变化方面提供政策建议。

本书综合考虑社会能源经济环境，在气候变化综合评估框架下，利用改进的 GCAM，根据碳税方案和低碳减排技术方案设定了碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术和无碳捕集与封存 (no carbon capture and storage, NOCCS) 技术两组气候政策情景，在每组气候政策情景下，分别设置 450ppm、500ppm 和 550ppm 3 种限制目标浓度情景。在此基础上基于未来生物能源会得到大力发展和 2020 年全球开始实施碳税方案的假设，分析比较参考情景 (business as usual, BAU)、两组政策情景及每种限制浓度情景下 1990~2095 年土地利用变化、碳排放、生物能源供给等关键输出变量的变化特征，分析了在实施气候政策情景下中国未来土地利用变化的数量和空间分布特征，以及由此引起的碳排放变化趋势，模拟了特定土地利用类型生物能源的生产供应及其未来的数量变化和空间分布格局，并就生物能源发展对农业经济、能源消费和土地利用结构等的影响进行了分析。另外，本书还剖析了碳税和碳捕集与封存技术在减缓气候变化方面的作用。旨在进一步探索应对气候变化的土地利用最优化配置格局及为国家和区域在应对气候变化方面提供政策建议与参考依据。

全书共分为 7 章，第 1 章主要介绍本书的研究背景、研究的主要内容及方法。第 2 章概述了土地利用与土地覆盖变化、气候变化的国内外研究进展，解析了气候变化和土地利用与土地覆盖变化的关系，气候变化综合评估模型的研究动态。第 3 章论述了气候变化综合评估模型的理论基础及应用概况，并对选择引用 GCAM 的依据进行了阐释，并论述了本书数据来源处理及模型的校准过程，依据研究目

标进行情景设置。第 4 章基于情景分析比较了中国未来土地利用、碳排放效应及其影响。第 5 章基于情景分析比较了中国未来生物能源的生产供应和影响。第 6 章对主要研究结果进行了不确定性分析，对主要参数进行了敏感性分析，检验了模拟结果的稳定性和合理性，并对研究过程和模拟结果中可能存在的不确定因素进行了分析，以便对模拟结果给予更合理的解释。第 7 章提出了本书编写中存在的不足和对未来研究的展望。

本书在完成过程中得到了“中国农业科学院科技创新工程”和 973 计划项目“全球变化下人类活动推演及环境响应建模方法”（2015CB954101）的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于本书是在综合考虑社会经济能源活动和自然环境的基础上进行的研究，加之土地利用与土地覆盖变化本身的复杂性，在学科和研究背景综合交叉的情况下，对编著者的专业背景和知识开阔程度要求较高，作为农学专业背景的编著者，尽管在这方面做了大量的调查研究及花费了大量的精力，但对相关问题的认识和理解仍存在缺陷，相关研究和应用正处于不断完善之中，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正，也敬请各位专家、学者多提宝贵意见。

编著者

2017 年 11 月 22 日

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 全球气候变化概述	1
1.1.1 气候变化概念	1
1.1.2 应对气候变化	2
1.2 应对气候变化研究现状	3
1.3 土地利用与气候变化	5
1.3.1 土地利用	5
1.3.2 土地覆盖	6
1.3.3 土地利用和土地覆盖关系	6
1.3.4 土地利用与土地覆盖变化 (LUCC) 和全球气候变化	7
第 2 章 土地利用变化及应对气候变化模型研究进展	9
2.1 土地利用与土地覆盖变化研究进展	9
2.1.1 LUCC 驱动力机制	10
2.1.2 LUCC 的模型研究	12
2.1.3 LUCC 的环境效应	13
2.1.4 LUCC 与可持续发展	16
2.1.5 LUCC 面临的挑战	16
2.2 应对气候变化评估模型方法学应用	18
2.2.1 自上而下模型	18
2.2.2 自下而上模型	20
2.2.3 混合模型	21
2.2.4 气候变化综合评估模型	21
第 3 章 气候变化综合评估模型 GCAM 的理论框架	25
3.1 应对气候变化评估模型的选择	25
3.2 气候变化综合评估模型 GCAM 框架	27
3.2.1 GCAM 的概述	27

3.2.2 能源模块 (ERB)	28
3.2.3 农业土地利用模块 (AGLU)	28
3.2.4 大气循环模块 (MAGICC)	28
3.3 GCAM 中农业土地利用模块概述	29
3.3.1 市场结构	30
3.3.2 需求市场	30
3.3.3 供应市场	31
3.3.4 AGLU 的 AEZ 分区	31
3.4 GCAM 中农业土地利用类型的分配机制	32
3.4.1 离散选择模型的概念	33
3.4.2 随机效用最大化理论	33
3.4.3 巢式 Logit 离散选择模型	34
3.4.4 GCAM 中的 Logit 土地分配	35
3.5 GCAM 数据和情景设置	40
3.5.1 数据来源及处理	40
3.5.2 中国区域数据的基准年校准	47
3.5.3 情景设置	48
第 4 章 土地利用变化及其影响研究	59
4.1 土地利用变化与碳税和低碳发展技术	59
4.1.1 碳市场机制和生态系统的碳汇价值	59
4.1.2 CCS 技术的应用	61
4.2 土地利用变化与能源需求和温室气体减排	61
4.2.1 一次能源消费结构	62
4.2.2 生物能源消费量	62
4.2.3 二氧化碳的排放量	64
4.2.4 二氧化碳的浓度路径	65
4.2.5 不同情景下的碳路径及减排成本	65
4.3 全球土地利用面积变化	67
4.4 中国土地利用面积变化及时空分布	70
4.4.1 中国土地面积变化总趋势	70
4.4.2 耕地	72
4.4.3 森林	76

4.4.4 草地	77
4.5 土地利用变化汇源效应及其影响	79
4.5.1 土地利用变化的碳排放机制	79
4.5.2 陆地生态系统的碳分布格局	84
4.5.3 土地利用变化引起的碳排放预测	87
4.6 本章小结	89
第5章 生物能源模拟研究	91
5.1 生物质能的相关概念	92
5.1.1 生物质	92
5.1.2 生物质能	92
5.1.3 生物燃料	92
5.1.4 一代、二代和三代生物燃料	92
5.2 生物燃料的来源	94
5.2.1 农林废弃物	94
5.2.2 能源作物	95
5.2.3 城市固体垃圾	97
5.3 生物质的生产转化技术及其应用	98
5.3.1 物理转化法	98
5.3.2 热化学转化法	99
5.3.3 生物化学转化法	99
5.4 农林业生物能源的变化预测	100
5.4.1 相关概念及理论	100
5.4.2 农林生物能源数量和空间格局变化	102
5.5 能源作物的变化预测	104
5.5.1 能源作物面积和产量变化	105
5.5.2 能源作物的空间分布	107
5.6 MSW 的变化预测	107
5.7 生物能源发展的影响研究	108
5.7.1 生物燃料对农业经济的影响	109
5.7.2 生物能源对能源消费结构的影响	110
5.7.3 生物能源对土地利用结构的影响	113
5.7.4 生物能源的其他影响	114

5.8 本章小结	116
5.8.1 生物能源、碳税和 CCS 技术在减缓气候变化中的作用	116
5.8.2 气候情景下农林剩余物和土壤有机碳的关系	117
第 6 章 不确定性分析	119
6.1 模型研究的不确定性来源	119
6.2 生产力变化的敏感性分析	120
6.2.1 土地利用变化的碳排放	120
6.2.2 土地利用结构	122
6.2.3 农产品价格的变化	125
6.2.4 生物能源生产消费量的变化	125
6.2.5 能源消费结构的变化	126
6.3 本章小结	128
第 7 章 研究结果与展望	129
7.1 本书主要结论	129
7.1.1 土地利用与土地覆盖变化	129
7.1.2 碳排放效应	130
7.1.3 生物能源的模拟预测	130
7.1.4 生物能源发展的影响	131
7.1.5 气候政策下的减排成本	132
7.1.6 不确定性分析	132
7.2 研究展望	133
参考文献	134
附图	

第1章 概 论

近年来,随着全球生态环境资源问题的日益严重,自然和人类活动引起的全球环境变化问题已受到国际学术界的普遍关注,以气候系统(包括岩石圈、大气圈、水圈、冰冻圈和生物圈)为主要研究对象的全球变化科学得到了不断完善和发展,人类活动、土地利用与土地覆盖变化和全球气候变化是全球变化研究的核心及有机组成部分。“土地利用与土地覆盖变化”(land use and land cover change, LUCC)是构建人类活动和环境变化之间的中心环节,是人地关系的集中体现。而以人类活动为主导因素所导致的土地利用与土地覆盖变化则通过地球生物物理化学大循环过程影响着全球的气候变化(王晗,2008)。由于土地利用与土地覆盖变化是一个相当复杂的过程,同时受到社会、经济和自然等众多因素的影响,而且还关系到人类生存环境的发展。因而土地利用与土地覆盖变化及气候变化成为全球变化研究的难点和热点,其研究成果也在土地资源的合理开发利用与保护及生态经济与环境协调发展等方面起到了重要作用。本章对土地利用与土地覆盖变化的主要研究内容及与全球气候变化等相关研究进行了概述。

1.1 全球气候变化概述

1.1.1 气候变化概念

气候变化是指气候平均状态随时间的变化,即气候平均状态和离差两者中的一个或两个一起出现了统计意义上的显著变化。离差值越大,表明气候变化的幅度越大,气候状态越不稳定。气候变化泛指各种时间尺度气候状态的变化,范围从最长的几十亿年到最短的年际变化。

气候变化的原因可能是自然的内部进程或是外部强迫,或者是人为地持续对大气组成成分和土地利用的改变,既有自然因素,也有人为因素。自然因素包括太阳辐射的变化、地球轨道的变化、火山活动、大气与海洋环流的变化等。在人为因素中,主要是由于工业革命以来人类活动特别是发达国家工业化过程的经济活动引起的温室气体增加,加强了温室效应;另外,由于对森林乱砍滥伐,大量农田建成城市和工厂,破坏了植被,减少了将二氧化碳转化为有机物的条件;再加上地表水域逐渐缩小,降水量大大降低,减少了吸收溶解二氧化碳的条件,破坏了二氧化碳生成与转化的动态平衡,使大气中的 CO_2 含量逐年增加,从而使地

球气温发生了改变。工业革命以来,大气中急剧升高的 CO₂ 浓度主要由人为因素造成,1750~2011 年,全球人为累积 CO₂ 排放量为 2 万亿 t,其中 30%被海洋吸收,30%被自然陆地生态系统吸收,剩下的 40%留存在大气中,相比于工业革命以前,大气中 CO₂ 的浓度升高了 40% (邹骥等,2015)。气候变化的影响是多尺度、全方位、多层次的,正面和负面影响并存,但它的负面影响更受关注。全球气候变暖已经对全球许多地区的自然生态系统产生了影响,如海平面升高、冰川退缩、湖泊水位下降、湖泊面积萎缩、冻土融化、河(湖)冰迟冻早融、中高纬度植物生长季节延长、动植物分布范围向极区和高海拔区延伸、某些动植物数量减少、一些植物开花期提前等。自然生态系统由于适应能力有限,容易受到严重的、甚至不可恢复的破坏,冰川、珊瑚礁岛、红树林、热带雨林、极地和高山生态系统、草原湿地、残余天然草地和海岸带生态系统等正面临着严重的灾难。随着气候变化频率和幅度的增加,遭受破坏的自然生态系统在数目上会有所增加,其地理范围也将增加。

1.1.2 应对气候变化

全球气候变化问题引起了国际社会的普遍关注,人类为了应对气候变化所带来的影响,正在积极采取减缓和适应措施来应对所面临的挑战。随着联合国气候变化框架条约的发展,针对气候变化的国际响应逐渐成形。1979 年第一次世界气候大会呼吁保护气候。1992 年通过的《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)确立了发达国家与发展中国家“共同但有区别的责任”原则,阐明了其行动框架,力求把温室气体的大气浓度稳定在某一水平,从而防止人类活动对气候系统产生“负面影响”,并于 1995 年在柏林召开了第一次缔约方会议(COP1)。1997 年通过的《京都议定书》确定了发达国家 2008~2012 年的量化减排指标,主要工业发达国家的温室气体排放量要在 1990 年的基础上平均减少 5.2%,其中欧盟将 6 种温室气体的排放削减 8%,美国削减 7%,日本削减 6%。1999 年通过了《联合国气候变化框架公约》附件,包括缔约方国家信息通报编制指南、温室气体清单技术审查指南、全球气候观测系统报告编写指南,并就技术开发与转让、发展中国家及经济转型期国家的能力建设问题进行了协商。2007 年 12 月达成的巴厘路线图,确定就加强 UNFCCC 和《京都议定书》的实施分头展开谈判,并于 2009 年 12 月在哥本哈根举行缔约方会议。2010 年在墨西哥坎昆将《哥本哈根协议》法律化,确立各国减排目标,设立新的技术机制,并设立发达国家资金援助机制。2011 年在南非德班将《京都议定书》的法律效力延长了 5 年,启动了绿色气候基金。2012 年通过《多哈修正》,法律上确保了《京都议定书》第二承诺期在 2013 年开始实施。2015 年 12 月通过

《巴黎协定》，各方将加强对气候变化威胁的全球应对，把全球平均气温较工业革命前水平升高控制在 2°C 以内，并为把升温控制在 1.5°C 以内而努力。全球将尽快实现温室气体排放达峰，21世纪下半叶实现温室气体净零排放；2016年在摩洛哥马拉喀什《巴黎协定》生效。

中国是一个发展中国家，尽管最近几十年来社会经济取得了突破性的发展，但由于历史原因，人口基数大，人均占有自然资源较少。在全球气候变暖的大趋势下，中国将面临减缓和适应气候变化的双重挑战。已有研究表明，气候变化已经对中国的能源经济、农业生产、粮食安全、水资源、近海环境和人类健康造成了或即将产生巨大的影响（气候变化国家评估报告编写委员会，2007）。减缓气候变化是指人类社会可以选取相应的经济、技术、生物等各种政策、手段或措施，通过削减温室气体的排放源和（或）增加温室气体的吸收汇对气候系统实施干预，而这些手段或措施的实施将会对社会经济系统产生一定的影响（Parry，2007）。适应气候变化是指自然和人为系统对于实际的或预期的气候刺激因素及其影响所做出的趋利避害的反应（陈迎，2005），减缓和适应气候变化是应对气候变化的有机组成部分。Parry（2007）综合评估了减缓气候变化的最新研究成果，分析了中长期温室气体的减排情景、减排潜力、减排成本及稳定温室气体浓度水平的可能选择，并且提出稳定温室气体排放水平的主要减缓措施是市场机制和政府干预。鉴于市场机制的重要性，IPCC 对各个国家和地区规定了碳限额排放，并通过碳市场机制实现减排目标。另外，由于气候变化的累积性效应，排放到大气中的温室气体将会对气候系统产生深远的影响，进而对自然生态系统和社会经济系统产生许多长期不利的影响，因而人类在减缓排放的同时，必须采取相应措施来适应这种变化。

减缓是挑战，适应是现实。人类所面临的全球气候变化问题不仅是科学问题，也是环境问题、经济问题、能源问题和政治问题。全球变化科学的发展为人类所面临的困境提供了理论基础和解决途径，为“天人合一”的理想和人类与自然的和谐发展提供了新的契机。

1.2 应对气候变化研究现状

国内学者对减缓和适应气候变化进行了大量研究，包括人口及城镇化因素对 CO_2 排放的影响、不同温控目标下排放峰值的问题、低碳技术的评估及可行性分析、产业结构优化分析、其他减排方式的潜力等。

我国在《巴黎协定》下的自主贡献目标主要包括：到2030年单位GDP的 CO_2 排放强度比2005年下降60%~65%，非化石能源占一次能源消费中的比例提升到20%左右，森林蓄积量比2005年增加45亿 m^3 ，2030年左右 CO_2 排放达到峰值并努力早日达峰（何建坤，2016）。

相关研究表明, 人口增长对全球 CO_2 排放量增长的影响为 40%~60%, 且人均碳排放量与人均 GDP 呈正相关关系。胡雷(2016)采用对数平均迪氏指数分解方法(logarithmic mean Divisia index, LMDI)量化分析我国城镇化中的规模效应、结构效应和技术效应对 CO_2 排放的影响, 结果表明, 城镇化过程中, 人均 CO_2 排放增加的因素是城镇化导致的经济增长, 人均 CO_2 排放减少的因素是城镇化过程中结构的调整和技术的发展。王艳君等(2017)对不同温控情况人口峰值进行了研究, 结果显示, 1.5°C 升温目标下, 中国人口在 2025~2030 年达到峰值, 约 13.9 亿人, 与 2010 年相比, 人口总数增加 0.44 亿人; 2.0°C 升温目标下, 中国人口在 2030~2035 年达到 14.1 亿的峰值。

新能源技术发展是从根本上应对温室效应的关键。全球应对气候变化推动了世界范围内能源体系的革命性变革, 风电、太阳能发电等可再生能源发电技术迅猛发展, 成本快速下降, 印度大规模光伏电站的投标价格已下降到 3.5 美分/($\text{kW}\cdot\text{h}$), 其发电成本已与常规发电技术相当(何建坤等, 2016)。

森林植被具有重要的固碳作用, 通过光合作用将大气中的 CO_2 吸收并且以生物物质的形式固定在机体内部和土壤中, 从而达到固碳的目的。相关报道显示, 森林植被每生产 1t 的生物质, 可以消耗 1.6t 的 CO_2 ; 每生长 1m^3 的植被, 可以固定 360kg 的 CO_2 , 因此增加森林蓄积量是应对气候变化最具经济效益的措施。因毁林开荒和森林退化造成的全球温室气体排放占近 17%(IPCC, 2007)。

产业升级、提高能效是实现低排放的有力措施。耿静等(2016)利用我国 2011~2015 年典型产业淘汰落后产能数据, 研究了通过淘汰落后产能实现产业结构减排的净能源节约量, 估算结果表明淘汰落后产能是节能减排的有效之举。何建坤等(2016)对中国碳排放状况、分部门减缓碳排放的技术潜力和成本等问题进行了分析与评估, 指出需加快经济结构调整和增长方式转变, 控制能源需求总量的过快增长, 建立以新能源和可再生能源为主体的可持续能源体系, 实现 2020 年 GDP 碳排放强度比 2005 年水平下降 40%~45%的目标, 分行业、分地区地推进碳排放峰值尽早实现。

各国学者及相关机构关于应对气候变化做了大量调查研究, 尤其是《巴黎协定》后, 各国积极应对, 各抒己见, 各国研究一方面致力于节能减排、产业升级、非化石能源发展的传统减缓途径; 另一方面致力于干预地球环境和气候的人工技术。《巴黎协定》确立了全球温控长期目标, 即 2°C 目标, 并努力实现 1.5°C 目标。IPCC AR5 分析指出, 对于 2°C 目标, 全球温室气体排放总量要在 2050 年比 2010 年水平降低 40%~70%, 并在 2080~2100 年实现净零排放, 其中全球工业 CO_2 排放要在 2050 年比 2010 年水平降低 35%~80%, 并在 2060~2075 年实现净零排放。而对于 1.5°C 目标, 能源系统的去碳化速度必须大幅增加, 电力行业必须提前到 2050 年实现零排放。2010~2050 年, CO_2 排放量年下降速率, 2°C 目标下为

1.2%~1.8%，1.5℃目标下要提高到2.0%~2.8%。

Horton 等 (2016) 指出若要实现 1.5℃ 目标，地球工程必须发挥重大作用。地球工程是人类为了应对气候变化及其影响，对地球环境和气候进行干预而采取的大规模的人工技术与方法的总称，分为碳移除 (carbon dioxide removal, CDR) 和太阳辐射管理 (solar radiation management, SRM) 两大类。CDR 旨在通过包括海洋施肥，土地利用管理，碳捕集与封存/碳捕集、利用与封存 (CCS/CCUS) 技术，生物质利用加碳捕集与封存 (BECCS) 技术等人工手段减少碳排放或移除大气中的 CO₂。Lewis 和 Maslin (2015) 分析了地球工程碳移除技术的作用。SRM 旨在通过影响太阳辐射为地球“直接降温”，主要包括平流层注射硫酸盐气溶胶、设置太空反射镜，以及海洋云层增白、屋顶涂白、沙漠绿化等改变地表反照率的方法和技术。2014 年，IPCC AR5 对 SRM 进行了评估，认为在缺乏充分研究的情况下不应盲目开展 SRM 实践活动 (IPCC, 2014)。

全球性气候变化主要表现在气温的升高、降水的时空变异、极值事件的频繁发生，以及其他水文要素大小及时空分布的变化上，这些变化直接导致流域水资源量发生改变，同时使得水体温度上升、土壤侵蚀加重、水生生物生存环境等遭到破坏，进而影响流域水环境现状。目前关于气候变化对水环境影响的研究正处于一个模型模拟定量化影响大小的阶段。

1.3 土地利用与气候变化

1.3.1 土地利用

土地利用是指为了获得所需产品或服务人类所进行的以土地资源为对象的利用活动。整个过程包含着人类利用土地自然属性的目的和意图及其利用方式和状况的变化，亦即自然生态系统向人工生态系统的转变过程，土地利用同时受到多方面条件的共同影响和制约，是一个自然、社会、经济和技术等诸要素综合作用的复杂过程，土地利用也是经济学家、地理学家、人类学家和规划者等社会科学所研究和关注的范畴 (李元, 2000; 吴传钧和张家楨, 1999; 吴建国, 2007)，而土地垦殖是人们改变土地利用和土地覆盖最主要的方式，因此，农业、放牧和城市建设等用地都是土地利用的概念。由于土地利用研究范围广，涉及学科多，很多学者对土地利用概念进行了不同的阐释 (毕宝德, 1990; 李边疆和王万茂, 2008; 李秀彬, 2011; 林英彦, 1992; 王万茂, 2002)，在此不一一赘述。

土地利用变化是指农业、林业、牧草地及其他土地管理活动对整个景观的改变，包括不同土地利用方式的变更或某种土地利用方式的扩张 (Turner II and Meyer, 1994)。

1.3.2 土地覆盖

土地覆盖是指地表自然形成的或者人为引起的覆盖状况，其指的是土地中的植被、水和土壤等物理状态。土地覆盖强调的是土地的自然属性及人类活动的结果，森林、草原、河流、冰川和城市等分属不同的土地覆盖（陈佑启和杨鹏，2001；郑海金等，2010），其主要为自然科学所关注。土地覆盖是陆地生命支撑系统的主要组成部分，其在很大程度上影响着地球系统其他组成的变化。例如，土地覆盖的变化会影响地面反照率及生态系统的光合作用，而且也会进一步影响地球的生物地球化学循环、生态系统的生产力和生物多样性等（陈佑启和杨鹏，2001；郑海金等，2010）。土地覆盖变化包括逆转和改造等两种变化方式，逆转变化是指从一种土地覆盖类型变成另一种土地类型，改造变化是指同一种土地利用类型下改变其土地属性。

1.3.3 土地利用和土地覆盖关系

土地利用和土地覆盖是两个既有密切联系又有本质区别的重要概念，前者是指人类对土地的管理行为；后者主要是描述植被的物理状态（如森林或农田）（吴建国，2007）。土地利用和土地覆盖也可理解为事物的两个方面，既包括发生在地面的过程，也包括各种地表过程（包括土地利用）的产物（Dale, 1997）。土地覆盖是指覆盖地面的自然物体和人工建造物，它包括已利用和未利用的各种要素的综合体，其含义与土地利用近似（王晗，2008）。由于大多数情况下土地利用与土地覆盖所指的对象相同，因而这两个概念很容易被混淆，例如，当同一块草地或作物被用于放牧或种植粮食等，指的是相应的土地利用；若不考虑其使用目的和用途而仅将其看作植被时，就指的是相应的土地覆盖（摆万奇和柏书琴，1999）。一种土地利用类型对应于一种土地覆盖类型，一种土地覆盖类型却可以对应多种土地利用类型；一类土地利用类型的变化可能会涉及多种土地覆盖类型的变化，而且特定土地利用类型的变化必然会引起土地覆盖属性的变化（Turner II and Meyer, 1994；吴建国，2007）。土地利用变化导致土地覆盖的变化主要包括渐变、转换和维护等3种类型，渐变是指同一种土地覆盖类型内部的变化，如森林的疏伐和农田施肥等管理活动；转换是指一种土地覆盖类型转变为另一种土地覆盖类型，如农田转变为森林或草地等；维护也属于土地覆盖变化的一种形式，主要目的是通过人类活动让原有土地覆盖形式保持一定的状态（Turner II and Meyer, 1994）。

土地利用是引起土地自然属性发生改变的最直接和主要的驱动因子，同时也

是人类活动作用于自然环境的主要途径之一。土地利用无论在全球还是在区域尺度上都在不断地加速土地覆盖的变化,而且其影响也远远超过了其他自然因素的作用;而土地覆盖也会反作用于土地利用并改变其利用方式。由于土地利用和土地覆盖之间的密不可分性,而且它们对全球环境系统广泛深刻的影响,因此一般将二者作为一个整体来考虑,共同应用于全球环境变化的研究中(郑海金等,2010)。

1.3.4 土地利用与土地覆盖变化(LUCC)和全球气候变化

人类对食物、纤维、水和居住地的大量需求导致全球土地利用格局发生了巨大的变化,而土地利用变化则是人类影响气候变化的重要强迫因子之一(Parry, 2007)。土地利用与土地覆盖变化对气候变化的影响,其归根到底是土地利用结构的改变导致土地覆盖的变化,进而引起土壤圈和生物圈碳库的损失,并将大量的温室气体(主要包括 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)排放到大气中,从而引起大气组成成分的改变,最终引起了全球气候变化。此外,土地利用与土地覆盖变化还可以通过改变地表反照率,进而改变全球能量分配及水热循环模式等途径来影响气候变化,而气候变化也将反作用于LUCC的结构与功能(唐华俊等,2004)。

1. LUCC 对气候变化的影响

土地利用与土地覆盖变化对气候变化的影响包括温室气体的排放和陆面反照率的改变。温室气体排放主要是不合理的土地利用促使 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体大量排放到空气中,从而改变了大气的组成成分,由此引起的温室效应导致了全球气候变暖。人类引起的土地利用与土地覆盖变化在过去的150年导致进入大气中的 CO_2 净流量与化石燃料源相当;而且同期 CH_4 在大气中的浓度也增加了一倍,人类活动导致的 CH_4 排放量的变化绝大多数都与土地利用变化相关(赵振家等,1996)。

据估计,在20世纪80年代,热带森林的破坏至少向大气释放出10亿~15亿t的 CO_2 。湿地是 CH_4 的主要来源,人类的活动促使湿地存储的大量碳排放到大气中,其中 CH_4 的排放量占到总排放量的21%。耕地是人类活动最频繁的人工生态系统,为了获得更多的产品,大量的森林、草地用来种植农作物,导致其存储的碳库大量损失;不合理的管理措施,致使土地退化;大量化肥的使用,导致 N_2O 的大量排放。森林、草原、农田之间的转变,土地退化等导致土地覆盖的变化,进而影响局地陆面反照率(森林的反照率是12.5%,而草地的反照率是21.6%),最后改变了大气的辐射强迫,最终引起全球大气循环的改变。有无植被覆盖对大气水分含量和对流活动的影响具有较大差别,植被覆盖的存在可以增加上空空气温度,进而产生热力强迫中尺度植物风环流,增加对流性降水(罗哲贤,

1994), 而且植被覆盖可以减少径流, 增加保水能力, 对于全球气候变化有减缓作用(周广胜等, 2003)。过去的 300 年, 森林砍伐致使陆面覆盖的变化引起全球年均温降低 $0.09\sim 0.16^{\circ}\text{C}$, 北半球年均温降低 $0.14\sim 0.22^{\circ}\text{C}$, 约占整个历史的 $4/5$ (石正国等, 2007)。

2. LUCC 对气候变化的响应

土地利用和土地覆盖的结构与功能都与气候变化存在着密切的联系, 特定的气候环境具有特定的土地覆盖类型, 因而, 全球气候格局分布的变化, 必将影响地表植被覆盖类型的分布特征, 进而使得土地利用类型的结构和功能发生改变。

目前以温度升高为特征的全球气候变化已经产生了巨大的影响。气候变化对土地利用与土地覆盖变化主要通过 3 种途径实现: ①气候的长期变化, 特别是目前的全球气候变暖; ②年际和季节上的气候变化; ③与气候变化有关的各种自然灾害, 如干旱、洪涝、森林火灾、草原火灾、荒漠化和病虫害等(李克让等, 2000)。全球气候变化对农业生态系统的影响最大, 而且对农业生产的影响表现复杂且具有较大的不确定性, 全球变暖将使温度带北移, 年平均气温每增加 1°C , 北半球中纬度的作物种植带将在水平方向上向北移动 $150\sim 200\text{km}$ 和垂直方向上向上移动 $150\sim 200\text{m}$ (蔡运龙, 1996)。二氧化碳的倍增, 总体上不利于水稻的生产, 水稻产量将下降, 而小麦产量则会上升, 这将进一步导致农业种植格局的改变(徐斌等, 1999)。气候变暖影响区域或局地降水和气温, 进而改变森林草地等生态系统的净初级生产力, 而且还会影响生物多样性等。另外, 气候变暖导致的应对气候变化政策措施促进了生物能源的发展, 届时将进一步改变局地的土地利用格局, 进而影响土地覆盖类型的改变, 又将进一步影响气候变化。

总之, 土地利用与土地覆盖变化是全球变化最直接、最重要的表现, 土地利用这种人类干涉活动几乎对绝大部分全球环境产生了巨大影响, 尤其是对全球气候变化, 因此其也成为全球变化研究备受关注的焦点。

第 2 章 土地利用变化及应对气候变化 模型研究进展

LUCC 是全球变化研究的核心组成部分, 作为目前研究的热点和前沿问题, 中国学者在 LUCC 研究方面也取得了很多成就, 但同国际上的研究相比, 我国的 LUCC 研究还处于发展阶段, 主要是以跟踪与模仿应用为主 (刘成武和黄利民, 2004), 还需进一步地深化, 如加强区域尺度的多层次和多样化研究, 加强遥感技术 (remote sensing, RS)、地理信息系统 (geography information system, GIS) 和全球定位系统 (global positioning system, GPS) (3S 技术) 集成在数据处理中的作用及统一 LUCC 分类指标, 构建具有中国特色的综合研究框架等。目前, 国内尚无完全自行开发的人类-环境耦合集成的气候变化综合评估模型, 也没有在 IPCC 所基于的全球排放情景和浓度路径下, 在大的空间尺度和更长的时间维度上来考虑中国的 LUCC 研究。因此, 选取合适的气候变化综合评估模型, 在全球气候政策情景下模拟中国的土地利用与土地覆盖变化和气候变化的关系, 进一步探讨适合中国国情的研究方法, 寻求特定土地利用方式对气候变化的减缓作用, 探索应对气候变化土地利用最优化的配置格局, 对规范和推动我国 LUCC 研究具有重要意义。

2.1 土地利用与土地覆盖变化研究进展

为了应对人类面临的一系列环境恶化问题, 从 20 世纪 80 年代开始, 国际社会展开了大规模、跨学科、综合性的全球变化研究项目。20 世纪 90 年代, 国际地圈生物圈计划 (International Geosphere-Biosphere Program, IGBP) 启动了土地利用与土地覆盖变化 (LUCC) 研究, 当时争论的焦点是土地利用和土地覆盖是否能在地球系统动力学中发挥作用。随后国际地圈生物圈计划通过 LUCC 的研究认为“全球变化远不仅是气候变化, 全球变化目前正在发生而且在许多方面正在加速”, 并由此促进了 IGBP 与国际全球环境变化人文因素计划 (International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP) 之间进一步合作, 最后在 2005 促成了“综合陆地生态系统与大气过程研究”(Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study, iLEAPS) 和全球土地计划 (Global Land Project, GLP) 的形成, 同时 LUCC 也促进了“地球系统科学伙伴组织”(Earth System Science Partnership, ESSP) 的联合计划“全球环境变化与食物系统”(Global

Environmental Change and Food System, GECAFS) 的形成。并且 LUCC 也对“地球系统分析、集成与模拟”(Analysis, Integration and Modeling of the Earth System, AIMES) 和“过去全球变化”(Past Global Changes, PAGES) 计划的新发展与 IGBP 中“综合地球系统观”的形成做出了一定的贡献。

从全球变化研究项目的内容来看,其主要项目都与 LUCC 有关,具体而言,以 LUCC 有关知识作为基础的全球变化研究主要涉及以下几点:①土地覆盖与大气循环的相互作用,主要包括生物地球化学、大气化学成分及大气水分与能量;②生物多样性,主要包括生态系统结构与功能、物种与遗传多样性和土地覆盖破碎;③人类可持续发展,主要包括土壤利用与侵蚀速率、土壤肥力保持、水资源开发利用、农业生态潜力与承载力、农村规划、环境与发展与国内与国际政策;④全球气候变化的响应,主要包括土地利用与覆盖变化对气候变化的敏感性、对气候变化有减缓作用的土地利用;⑤综合建模与评估,可见 LUCC 研究既是全球变化的组成部分,也是深入开展全球变化研究的重要基础(唐华俊等,2004)。土地利用与土地覆盖变化研究的核心是:土地利用与土地覆盖变化及其动力机制、土地利用与土地覆盖变化发生区域、土地利用与土地覆盖变化全球模型。

对 LUCC 研究的思路 and 认识基础主要包括:“土地覆盖变化与全球环境变化”“土地利用变化与全球环境变化”“土地利用变化的人为因素和可能驱动力”“土地利用与土地覆盖变化之间的关系”。所以,IGBP 和 IHDP 在相关分析的基础上进一步确定了 LUCC 研究的重点:土地覆盖变化状况的评估;全球层面上 LUCC 的建模与预测;不同空间尺度上 LUCC 不同驱动力之间的联系;与 LUCC 研究相关数据的开发活动与数据信息系统(DIS)(唐华俊等,2004)。IGBP 和 IHDP 在实施战略中指出土地利用与土地覆盖变化应具体回答以下与人类的生存和发展密切相关的问题:近 300 年来,人类利用是如何引起土地覆盖发生变化的?在不同的地理和历史背景下,影响土地覆盖变化的主要人为因素有哪些?近 50~100 年,土地利用变化如何影响土地覆盖及其变化?人类与生物物理动力机制如何影响人类-环境耦合系统?生物地球化学圈层与气候的变化如何影响 LUCC,反之亦然?LUCC 变化又是如何作用于人类活动的?土地覆盖变化如何导致或加剧了某些特定区域的脆弱性(Lambin, 1997)?可以看出 LUCC 的研究不仅要进行土地利用与土地覆盖变化的预测,探讨其与全球变化的关系和作用;还要涉及与人类所面临的一系列可持续发展的问题(唐华俊等,2004)。当然,LUCC 研究的目的并不是回答这些问题,而是要寻求有效解决这些问题的方法和途径(Turner II et al., 1995; Lambin, 1997)。

2.1.1 LUCC 驱动力机制

土地利用与土地覆盖变化研究的基本过程是认识人类驱动力、土地利用与土