



关中—天水经济区生态系统 服务研究

李 晶 周自翔 著



科学出版社

关中-天水经济区生态系统 服务研究

李 晶 周自翔 著

陕西师范大学学科建设经费

国家自然科学基金项目(41371020) 资助

陕西师范大学中央高校基本科研业务费

特别支持项目(GK201502010)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以关中-天水经济区作为研究对象,对其生态系统服务进行研究。全书共9章,内容包括:生态系统服务理论、土地景观异质性与尺度效应、关天经济区生态系统服务功能时空演变、生态系统服务驱动力分析、碳储量价值和土地碳汇影子价格、生态系统服务与城市化耦合关系、生态系统服务权衡与协同、基于 SolVES 模型的生态系统服务的文化服务水平估算、生态系统碳服务流动。内容涵盖农田等主要土地利用类型,研究尺度从生态系统、景观到区域,具有广泛的代表性,体现了生态系统服务研究的前沿。

本书适合地理学、生态学、环境科学和经济学等专业的科研人员使用,也可作为高等院校和科研院所相关专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

关中-天水经济区生态系统服务研究/李晶,周自翔著. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-055326-3

I. ①关… II. ①李… ②周… III. ①经济区-生态系统-服务功能-研究-陕西 ②经济区-生态系统-服务功能-研究-天水 IV. ①X321.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 280569 号

责任编辑:亢列梅 徐世钊/责任校对:王 瑞 王晓茜

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:720 × 1000 B5

2017 年 12 月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:489 000

定价:135.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

生态系统服务是生态系统形成及所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用，是人类从生态系统中所获得的收益。生态系统服务主要包括向经济社会系统输入有用的物质和能量，接收和转化来自经济社会系统的废弃物，以及直接向人类社会成员提供服务（如人们普遍享用洁净空气、水等舒适性资源）。生态系统服务是人类福祉和可持续发展的基础，不仅能为人类提供食物、医药及其他工农业产品的原料，而且能维持生物地球化学循环和水循环、维持生物物种和遗传的多样性、净化环境、维持大气化学的平衡和稳定。巨大的人口压力导致生态系统长期遭受过度开发利用，生态系统和生态系统服务功能退化，生态系统呈现出由结构性破坏向功能性紊乱的方向发展，由此引起水资源短缺、水土流失、沙漠化、生物多样性减少等生态问题持续加剧，直接威胁人类的安全与健康。

关中-天水（关天）经济区是《国家西部大开发“十一五”规划》中提出的继成渝经济区和环北部湾（广西）经济区之后的第三个重点发展经济区，地跨陕、甘两省，范围包括陕西省关中地区和甘肃省天水市。关天经济区农耕文明历史悠久，种植业发展已有几千年的历史。随着耕作方式的改进，关天经济区种植业系统的生态服务功能也在发生着变化。开展关天经济区种植业系统生态服务功能与价值评估研究，对其服务功能价值进行科学、全面地评价，不仅可以帮助人们更为完整地认识种植业系统，而且可以更加全面地掌握关天地区种植业系统的现状及问题，从根本上认识理解、科学评价、合理调控和可持续利用种植业系统的生态服务功能，为种植业与其他产业协调发展提供理论依据，为种植业生态系统科学管理和农田生态安全研究提供技术支撑，保证种植业生态系统为人类的生存和可持续发展发挥更大的效用。

2010 年以来，作者承担国家自然科学基金青年项目“关中-天水经济区种植业生态服务功能的时空变异性与尺度效应”和面上项目“关中-天水经济区农田生态系统服务功能动力驱动机制与人类活动耦合关系”。本书是这两个基金项目成果的总结。

本书首先对关天经济区土地利用与土地覆盖变化、景观格局动态与格局尺度效应进行研究，定量分析景观格局与影响因子间的相互关系。以地理信息和遥感技术为支撑进行生态系统服务研究，对不同生态系统的生产有机物、水源涵养、土壤保持、净化空气、调节气候等生态服务价值和损失价值进行估算，并研究生

态系统服务功能的空间格局、组合结构、尺度特征和尺度效应。其次,研究生态系统服务对人类活动和环境扰动的响应与适应机制,并对生态系统服务功能和城市发展水平之间的耦合关系进行分析。运用生产可能性边界定量分析生态系统服务之间的权衡协同关系,根据最优曲线得出最佳情景以及指导未来土地利用规划和干预生态系统功能发展的过程。最后,量化区域生态系统服务的供需平衡状况,模拟生态系统服务的空间流动,揭示区域功能空间转变规律,并据此给出区域空间布局优化策略。

本书由李晶、周自翔统稿,各章撰写分工如下:第1章,李晶、陈登帅、周自翔;第2章,周自翔、冯雪铭、李建丽;第3章,周自翔、张薇薇、刘岩;第4章,李红艳、李晶、周自翔;第5章,井梅秀、高子轶;第6章,张伟、李晶、周自翔;第7章,郭钟哲、秦克玉、杨晓楠、周自翔;第8章,刘婧雅、赵琪琪;第9章,李婷、周自翔、曾莉。西安科技大学周自翔撰写25万字。

在撰写本书过程中,引用了国内外学者的研究成果,在此对这些学者的杰出工作致以崇高的敬意。在本书出版之际,向多年支持本书相关研究的陕西师范大学地理科学与旅游学院、西安科技大学测绘学院、陕西师范大学学科建设处、科学出版社相关人员和社会各界同仁表示衷心感谢。

由于书中的一些内容具有很强的探索性,本书难免有不妥之处,祈望读者不吝赐教。

作 者

2017年6月于陕师大

目 录

前言	
第 1 章 生态系统服务理论	1
1.1 生态系统服务的概念	1
1.2 生态系统服务研究现状	2
1.2.1 生态系统服务研究历史及分类	2
1.2.2 生态系统服务的价值评估	2
1.2.3 土地景观异质性与尺度效应研究现状	5
1.2.4 生态系统服务之间的权衡与协同关系研究现状	6
1.2.5 生态系统服务形成与驱动力研究现状	8
1.3 生态系统服务研究内容	9
1.3.1 土地景观尺度效应	9
1.3.2 生态系统服务的价值评估	9
1.3.3 生态系统服务的驱动力研究及与城市化耦合分析	10
1.3.4 生态系统服务权衡与协同	10
1.3.5 生态系统服务的空间流动及其优化分析	10
参考文献	11
第 2 章 土地景观异质性与尺度效应	17
2.1 基于土地利用的景观格局时空动态分析	17
2.1.1 分析方法及测度模型	17
2.1.2 土地利用总体变化特征	19
2.1.3 土地利用类型重心转移分析	30
2.1.4 土地利用空间变化区域差异	31
2.2 基于景观指数的景观格局动态分析	37
2.2.1 景观指数选取	37
2.2.2 景观格局动态分析	38
2.3 景观格局分析的尺度效应	44
2.3.1 粒度响应	45
2.3.2 尺度选择	50
2.3.3 幅度响应	52

2.4 景观格局驱动力分析	57
2.4.1 景观格局影响因素数据库	58
2.4.2 景观格局空间自相关	64
2.4.3 景观格局与影响因素回归分析结果	66
2.5 LCM 模型构建及关天经济区土地利用预测	71
2.5.1 模型原理	71
2.5.2 数据预处理	77
2.5.3 关天经济区土地利用变化分析	77
2.5.4 土地利用变化影响因子	79
2.5.5 关天经济区 2050 年土地利用模拟	84
2.5.6 结果与分析	87
参考文献	88
第 3 章 关天经济区生态系统服务功能时空演变	90
3.1 基于 CASA 模型的农田生态系统净第一性生产力估算	90
3.1.1 CASA 估算模型	90
3.1.2 关中-天水经济区 NPP 估算	91
3.1.3 关中-天水经济区农田生态系统 NPP 价值量估算	94
3.2 基于 GIS 的农田生态系统土壤保持功能估算	99
3.2.1 土壤侵蚀量的测算	99
3.2.2 农田生态系统土壤侵蚀测算	109
3.2.3 土壤保持经济效益的测评	116
3.3 关中-天水经济区农田生态系统涵养水源价值量估算	126
3.3.1 农田生态系统蓄水能力估算模型	126
3.3.2 蓄水能力价值量测评模型	127
3.3.3 涵养水源价值的估算过程	127
3.3.4 关中-天水经济区农田生态系统涵养水源价值量测评结果	132
3.4 关中-天水经济区农田生态系统净化环境测评	137
3.4.1 净化环境服务价值量估算	138
3.4.2 关中-天水经济区固碳释氧价值量估算	138
3.4.3 吸收 SO ₂ 、HF、NO _x 、滞尘价值估算	141
3.4.4 净化环境价值估算	146
3.5 关中-天水经济区农田生态系统粮食生产服务估算	148
3.5.1 关中-天水经济区农田生态系统粮食产量空间分布	148
3.5.2 关中-天水经济区农田生态系统粮食生产服务价值	150
3.6 关中-天水经济区农田生态系统生态环境效应综合评价	151

3.6.1 农田生态系统生态服务总价值估算模型	151
3.6.2 关中-天水经济区农田生态服务价值总量空间分布	151
3.6.3 关中-天水经济区农田生态服务价值空间转移分析	152
参考文献	155
第4章 生态系统服务驱动力分析	158
4.1 关天经济区生态服务价值变化研究	158
4.1.1 生态服务价值之间的关系	158
4.1.2 生态服务功能相互关系的空间差异	160
4.2 自然因素对关天经济区生态服务价值的影响	163
4.2.1 气候因素对生态服务价值及其变化的影响	163
4.2.2 地形因素对生态服务价值的影响	169
4.2.3 土壤因素对生态服务功能价值的影响	173
4.2.4 地貌对生态服务价值的影响	175
4.2.5 水文因素对生态服务价值的影响	177
4.3 关天经济区生态服务价值变化的人文驱动力分析	180
4.3.1 数据来源与分析方法	180
4.3.2 人文驱动机制结果分析	185
参考文献	188
第5章 碳储量价值和土地碳汇影子价格	190
5.1 碳储存功能价值评估	190
5.1.1 InVEST 模型	190
5.1.2 基于 InVEST 模型的碳储量估算	192
5.1.3 数据处理	192
5.1.4 不同情景下碳储量评估	196
5.1.5 不同情景下碳的 NPV 计算	200
5.2 基于净初级生产力的生态足迹计算	212
5.2.1 计算方法	212
5.2.2 关中-天水地区均衡因子和产量因子的计算	213
5.2.3 基于净初级生产力的生态足迹的计算	214
5.2.4 三维生态足迹模型	220
5.3 关中-天水经济区能源生态足迹	224
5.3.1 关中-天水经济区土地碳汇承载力	224
5.3.2 市场各部门能源生态足迹和土地碳汇承载力的核算	229
5.4 关中-天水经济区土地碳汇影子价格	230
5.4.1 扩展的投入-产出模型	230

5.4.2	扩展的投入-产出模型求解	232
5.4.3	投入-产出价格模型求解	239
5.4.4	土地碳汇影子价格的市场平均成本	240
	参考文献	242
第6章	生态系统服务与城市化耦合关系	244
6.1	城市化水平测度	244
6.1.1	城市化水平评价方法	244
6.1.2	城市化发展水平评价与分析	248
6.2	城市化与生态系统服务价值关系研究	254
6.2.1	城市化与生态系统服务功能的影响机制	254
6.2.2	城市化与农田生态系统服务价值的耦合关系	255
6.2.3	基于 STIRPAT 模型的农田生态系统服务价值对城市化发展水平的影响	269
6.2.4	城市化对农田生态系统服务价值的影响	271
	参考文献	272
第7章	生态系统服务权衡与协同	274
7.1	研究方法	274
7.1.1	生产可能性边界的概念与意义	274
7.1.2	生产可能性边界制作方法	276
7.2	关天经济区生态系统服务权衡与协同	276
7.2.1	生态系统服务相关性	276
7.2.2	关天经济区生态系统服务两两权衡关系	280
7.2.3	基于帕累托效率曲线的生态系统服务优化配置	293
7.2.4	多情景下生态系统服务的集成	297
7.2.5	渭河流域关天段生态系统服务时空变化	307
7.3	渭河流域关天段生态系统服务权衡与协同	319
7.3.1	渭河流域关天段生态系统服务之间关系研究	319
7.3.2	生态系统服务优化配置	322
	参考文献	331
第8章	基于 SolVES 模型的生态系统服务的文化服务水平估算	333
8.1	SolVES 模型简介	333
8.2	研究方法	334
8.2.1	环境背景值	334
8.2.2	问卷调查	336
8.2.3	构建地理空间数据库	338
8.2.4	原理分析	338

8.3 结果分析	340
参考文献	342
第9章 生态系统碳服务流动	343
9.1 关天经济区生态系统固碳服务的供需平衡	343
9.1.1 生态系统固碳服务的需求与供给模型	343
9.1.2 生态系统固碳服务需求	347
9.1.3 生态系统固碳服务供给	352
9.1.4 生态系统固碳服务供需平衡结果	359
9.1.5 结果验证	362
9.2 关天经济区生态系统固碳服务的空间流动	363
9.2.1 生态系统固碳服务的空间流动模型	363
9.2.2 生态系统固碳服务流动比率空间格局	364
9.2.3 生态系统固碳服务的空间流动模拟	366
9.3 低碳目标导向下的空间格局优化	366
9.3.1 低碳目标导向下的空间格局优化模型	366
9.3.2 生态系统固碳服务的关键变量子集分析	369
9.3.3 低碳目标导向下的固碳格局优化结果	373
参考文献	377

第 1 章 生态系统服务理论

1.1 生态系统服务的概念

生态系统服务是指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用^[1,2]。生态系统服务为人类直接或间接从生态系统中得到的所有收益，其主要包含生态系统向社会经济系统输送的能量和物质、接收和转化社会经济系统中的废弃物以及直接向人类提供服务的资源（食物、木材、清洁空气、水等）。生态系统的能流、物流和信息流等生态过程产生的生态系统服务功能是生态系统服务的基本来源，而人类不同层次的需求则是生态系统服务形成的基本驱动力。因此，生态系统服务是指生态系统自然环境在条件、过程以及构成方面对于支持和满足人类需求提供的多方面有形和无形的惠益，即人类赖以生存与发展所需要的资源和环境基础归根结底都来源于自然生态系统。

生态系统是指在一定时间和空间里，人和自然界构成的一个统一开放的系统。生态系统可以通过自身的一些功能，如调节气候、涵养水源、粮食供给、休闲娱乐等，为人类提供各种各样的利益。生态系统通常情况下可以通过自我调节而趋于一个稳定或平衡的状态。当生态系统受到的外部影响低于其自我调节能力的阈值时，通过自我调节，依然能够为人类提供服务；但生态系统的自我调节能力有限，当受到的外部影响超过阈值时，生态系统受到伤害甚至崩溃，将严重影响其为人类提供的福祉。随着人类社会对自然生态系统控制力的不断提高，为满足不断增长的物质和精神需求，人类对生态系统的直接或间接作用显著增强，对自然生态系统结构与功能进行强烈干预，导致其生态系统服务能力退化。根据联合国《千年生态系统评估报告》，在全球范围内，大约 2/3 在评估的生态系统服务遭到人类活动的破坏，导致服务能力的退化和丧失，并且这种退化趋势在 21 世纪中叶可能会恶化。生态系统服务能力的退化甚至丧失直接威胁着区域乃至全球的生态安全，不仅危及当代人类的社会福祉，而且会对未来生态系统对人类提供的惠益产生深远影响。生态系统功能的下降和退化将引起人类生存环境及其功能不可逆转的退化。因此，对生态系统及其结构、功能进行科学研究具有非常重要的意义。“千年生态系统评估”（the Millennium Ecosystem Assessment, MA）更是将生态系统服务功能研究列为 2013 年全球前百个科研热点，预示着研究者将更多地关注生态系统服务方面的研究。

1.2 生态系统服务研究现状

1.2.1 生态系统服务研究历史及分类

生态系统服务功能这一科学概念在 20 世纪 70 年代初提出后逐步被人们认可和普遍使用。人们意识到,人类一直依赖生存和发展的生态系统服务功能在发生退化和破坏。人们认识到生态系统服务功能退化是生态危机的根源后,才提出了这一问题的定义并将生态系统服务作为科学问题进行研究^[3]。此后,各国学者在生态系统服务功能方面做了大量的研究。经过多位学者的研究与补充,Ehrlich 等探讨了自然生态系统为人类提供的各种服务功能以及人类活动对生态系统服务功能的影响,正式将生态系统对人类社会的影响及其效能定义为“生态系统服务”(ecosystem services)^[4]。20 世纪 90 年代中期,美国生态学会由 Daily^[1]负责的小组详细阐述了生态系统服务功能的内涵、定义和分类等内容,并且将生态系统服务定义为:生态系统及其生态过程所形成与维持人类赖以生存的环境条件与效用。为了更加深入地了解生态系统服务与人类活动的关系,2001 年 6 月 5 日,联合国于世界环境日之际,由世界卫生组织、联合国环境规划署和世界银行等机构与组织开展了国际合作项目“千年生态系统评估”。千年生态系统评估项目系统研究了生态系统与人类福祉的关系,并重点对生态系统服务功能进行评估,为加强生态系统保护和可持续利用、提高生态系统对人类福祉的贡献奠定了科学基础。

在千年生态系统评估中,生态系统服务被划分为四大类:支撑服务、供给服务、调节服务以及文化服务^[5]。支撑服务是其他生态系统服务的基础,主要包括水文过程、生物地球化学过程以及生态学过程;供给服务包括食物、淡水、工业原材料等;调节服务包括调节气候、调节径流、净化水质等;文化服务包括美学、休闲、精神、教育等。生态系统服务直接关系到人类福祉,随着经济的不断发展,人类对于生态系统服务功能的利用持续增加。为了使人类能够对生态系统进行可持续的开发,实现对生态系统服务功能最大化的科学利用,对于多种多样的生态系统服务功能进行定量评估和权衡研究就显得极为关键。

1.2.2 生态系统服务的价值评估

目前,生态系统服务功能的研究及其价值评估已成为生态学研究中的热点问题之一^[6]。生态系统服务功能的内涵主要包括以下几个方面:有机质的生产与生态系统产品、气体调节和气候调节、生物多样性的产生与维持、传粉与种子的扩散、减缓干旱与洪涝灾害、保护和改善环境质量、有害生物的控制、休闲娱乐、

文化艺术——生态美的感受。典型的生态系统主要包括：森林生态系统、农田生态系统、湿地生态系统、草原生态系统和荒漠生态系统。

生态系统服务价值的研究始于1997年 Costanza 等在 *Nature* 上发表《全球生态系统服务与自然资本的价值估算》，随后各国纷纷开始对自然生态系统与人为生态系统的生态价值进行大量的探索性研究和尝试性的测评^[7]。不同的学者对生态服务的认识不同。其中，Daily 在其生态系统服务研究的标志性著作《自然服务：人类社会对自然生态系统的依赖》中将生态系统服务定义为：生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用，它不仅给人类提供生存必需的食物、医药及工农业生产的原料，而且维持人类赖以生存和发展的生命支持系统^[8]。Cairns 认为生态系统服务功能是对人类生存和生活质量有贡献的生态系统产品和生态系统功能^[9]。相比国外，国内生态系统服务价值评估研究起步较晚，但近年来发展快速。

随着人们对生态系统服务功能重要性的认识逐渐加强，生态系统服务价值评估已经成为当前生态经济学和环境经济学的研究热点和焦点；并且越来越多地在决策制定中考虑生态系统服务功能，对生态系统服务功能的研究需求与日俱增，使得相关理论基础、评估方法、数据获取手段和模型开发等的研究发展不断完善^[10]。生态系统服务功能评估模型是以已有的理论和研究成果为基础构建的，用于评价多种生态系统服务功能。目前具有代表性的模型有 InVEST、ARIES、SolVES、MIMES、EPM、InFOREST、Envision、Ecometrix、EcoAIM、ESvalue 等。这些评估模型的发展和应用为决策者和管理人员对生态系统服务功能的科学利用以及管理提供了至关重要的科学依据。作为一种自然资本，生态系统服务为人类提供源源不断的福利。过去决策过程中，没有与其他资本进行过量化比较，人类在可持续性生存方面付出了巨大的代价。随着生态、环境、资源和经济学的发展，用货币的形式评估生态系统服务功能得到不断完善和发展。在国内外研究中，生态系统服务价值的测评方法甚多，采用的主要方法有两种，即替代市场技术法和模拟市场技术法。前者以“消费者剩余”和“影子价格”来表达生态系统服务功能的经济价值，测算方法有市场价值法、费用支出法、旅行费用法、机会成本法和享乐价格法；后者以支付意愿和人们对生态系统的净支付意愿来表达生态系统服务功能的价值，测评方法主要是条件价值法。

例如，生态系统固碳服务的价值估算，固碳服务是生态系统服务中调节服务的重要组成部分。生态系统固碳服务通过生态系统的固碳功能捕获大气中的碳并把捕获到的碳固定起来，它可以抵消人类向大气中排放的一部分二氧化碳，从而起到调节气候的生态系统服务功能。在社会经济高速发展的今天，生态系统固碳服务的供需平衡不仅仅是生态权衡问题，还是经济发展与生态保护之间的博弈。协调区域生态系统固碳服务的供需平衡问题，是缓解全球气候变暖问题的关键。

然而, 由于土地利用变化、气候变化和社会经济等众多因子耦合在一起, 区域的生态系统固碳服务供需平衡问题具有较高的复杂性, 如何更加科学、有效地协调区域中碳源与碳汇的空间格局成为区域低碳发展所面临的一大难题。针对上述问题, 国内外专家学者从不同的角度不断努力和尝试, 取得了一些阶段性的成果, 但是总体而言, 对于区域的生态系统固碳服务的供需平衡、空间流动以及格局优化等研究仍然处于探索阶段。已有的研究表明, 土地利用变化和社会经济宏观调节是协调区域碳源汇平衡的重要且有力的手段。土地利用变化蕴含大量人类活动的信息, 是生态系统服务功能退化的主要驱动力之一^[11, 12]。作为引起区域碳排放的重要因素, 土地利用变化会对区域的碳循环过程产生深远的影响^[13]。一方面, 决策者可以通过改变土地利用格局, 调整碳源/汇格局以及碳循环过程, 进而影响区域碳收支状况。另一方面, 在低碳经济发展的时代趋势下, 经济政策手段将成为决策者宏观调控区域发展格局、引导产业结构调整、减少区域碳排放的重要工具。目前, 碳税和排放配额交易等政策被普遍认为是最具市场效率的减少碳排放的经济手段^[14]。欧洲的一些国家, 如荷兰和丹麦, 通过碳税政策获得了非常显著的减排效果^[15, 16]。我国也在碳税和排放配额交易方面做出了一些尝试, 国家发展和改革委员会 2013 年批准将五市二省(北京市、天津市、上海市、重庆市、深圳市、湖北省、广东省)作为碳排放交易试点。自交易试点启动以来, 交易规模不断扩大, 利用市场手段推进低碳经济发展初有成效。根据规划, 2017 年全国碳排放交易权交易市场将全面启动。因此, 将土地利用变化和市场经济因素纳入区域碳收支的核算中是必要的。

文化服务作为生态系统服务四大类之一, 是目前发展较其他三类最不成熟的一种服务^[17]。文化价值是指受益公众对于生态系统服务感知到的、非货币的价值, 如美学、娱乐以及精神价值等^[18]。文化服务在生态系统服务分类框架中虽然被重视, 但是无论是研究者还是公众对于文化服务的价值探究都比较缺乏, 这种情况被许多学者察觉并提出。随着人类对生态系统服务需求和利用的持续增加, 人们对于文化服务所提供的福祉越来越重视, 越来越多的人重视文化生态系统服务^[19, 20]。文化服务在定义与表示时并没有严格地运用量化的货币单位, 这是因为对于决策者来说货币价值并不是绝对和唯一的标准, 这使得利用 GIS(geographic information system, 地理信息系统)技术将公众感知到的、非货币的社会价值通过空间可视化的“价值指数”(value index, VI)表示出来成为可能。基于上述理论基础, 近年来许多国外学者尝试对文化服务进行评估, 其中的典型代表就是 SolVES 模型的开发与使用^[21]。例如, Sherrouse 等利用基于公众的社会价值调查数据结合相关的环境指数数据, 运用 SolVES 模型生成社会价值 VI 地图, 定量地评估了美国圣伊莎贝尔国家森林公园(PSI)地区的美学和娱乐价值, 指出了非货币价值指数对于生态系统服务社会价值评估的可行性和科学性^[22, 23], 从而介绍了一种新的评估方法和研究意义。国内

对于生态系统服务文化服务的研究则比较缺乏。

1.2.3 土地景观异质性与尺度效应研究现状

全球经济的迅速发展、科技的进步以及人口数量的剧增导致全球生态环境承受的压力越来越大。人类活动的加剧导致温室效应、全球环境污染、土地荒漠化、海岸、湿地生态系统遭到破坏以及极端气候事件的发生。反之,这一系列全球性重大环境问题严重威胁人类的生存和发展,对人类社会的可持续发展有重大影响。因此,自20世纪末以来,全球环境变化研究成为了学界最引人瞩目的环境与科学命题之一^[24]。景观作为人类活动载体,其格局特征变化会直接影响到环境变化^[25,26]。而土地利用与土地覆盖变化(land use and land cover change, LUCC)再现了地表景观的时空动态变化过程,且客观地记录了人类改变地表特征的空间格局,许多自然现象和生态过程的变化与其有关^[27-29],在区域生态环境和全球环境变化方面,LUCC及其对生态环境的影响具有重要的意义。景观生态学研究核心任务之一是景观格局分析,即景观类型镶嵌斑块在时空上的排列组合,因此,景观格局具有时空尺度依赖性,即尺度效应^[30,31]。尺度问题主要涉及3个方面:尺度概念、尺度分析和尺度推演^[32]。经过半个多世纪的发展,景观生态学已经进入一片新天地。当前,大多研究只依靠景观指数对景观格局和土地利用进行简单分析,景观格局与生态功能之间联系的研究还为数不多,为建立和完善景观生态学综合整体性,以区内分异和区域综合并重的多尺度、多维度耦合研究景观格局与生态过程将会是今后的研究热点^[33,34]。1939年,Naveh在对支配一个地区不同地域单位的自然-生物综合体的相关性研究中首次提出了景观生态这个术语^[35]。2000年,Saura等基于改进性随即聚类方法对景观格局进行了模拟^[36]。2001年,Tischendorf运用景观指数对生态过程进行预测,验证了格局指数对于解释特定类型缀块在异质景观中的扩散过程的作用^[37]。2005年,Corry等对利用景观格局指数评估景观规划与设计生态响应的局限性进行了分析^[38]。2007年,Dramstad等对视觉景观参数和基于地图的景观格局指数之间的关系进行了分析^[39]。2009年,Calvo-Iglesias以加利西亚(西班牙)北部的封闭、半开放系统为例,对以农田生态系统和人口的变化为驱动因子,对土地利用和景观动态变化进行了分析^[40]。

20世纪80年代初期是我国景观格局研究的起步阶段,林超、黄锡畴、陈昌笃把景观生态学引入了中国,景观格局作为其核心内容之一也在中国引起广泛关注^[41-46]。我国目前对景观生态的研究方向主要集中于景观格局、功能和动态研究上^[47]。1990年,肖笃宁等通过构造城市化指数评价区域的城市化进程趋势,景观格局的研究开始逐渐成为热点^[48]。2000年张明运用景观生态学的基本理论与方法选取景观指数对榆林脆弱环境的景观格局进行了分析,定量诊断该区景观生态演化的因子,探讨了该区域生态环境的景观过^[49]。2002年王兮之等应用ARC/INFO

与 FRAGSTATS 软件从斑块、类型和景观 3 个水平, 定量地分析了策勒绿洲的景观格局特征^[50]。2004 年丁圣彦等在遥感技术的支持下, 结合河南沿黄湿地的区域特点, 系统地分析了近 20 年河南沿黄湿地景观空间格局变化^[51]。2005 年唐立娜等基于遥感以吉林省长岭县为例对东北农牧交错区景观格局与变化做了研究^[52]。

1.2.4 生态系统服务之间的权衡与协同关系研究现状

生态系统服务相互联系、相互影响, 并且随时间表现出动态的相互影响的复杂关系。生态系统服务之间的关系一般表现为两种关系: 权衡和协同。权衡关系是指一种生态系统服务的提高或增加, 引起了另一种生态系统服务的减弱或降低, 呈现出此消彼长的关系。协同关系是指两种生态系统服务具有同样的上升或降低趋势, 一种服务的增加会对另一种服务产生一定的促进和增幅作用^[53, 54]。权衡关系一般包括供给服务之间、供给服务与调节以及支持服务之间两种类型, 如木材与粮食产量之间的权衡关系, 粮食产量与土壤保持之间的权衡关系。协同关系在四种生态系统服务中都存在, 但调节服务、支持服务和文化服务之间的协同关系比较常见。

国外在生态系统服务关系研究方面较为细化, 深入到了具体生态系统服务之间关系的研究^[55-59]。Jackson 等通过对 600 个样本观测建立模型计算, 得出造林可以协调地下水补给和上涌, 但同时减少了径流量以及使一些土壤盐碱化或酸化, 阐述了在造林的情景下, 区域内水源涵养、产水量及土壤盐碱度之间的权衡和协同关系^[60-62]。Noordwijk 等通过 FALLOW 模型, 选择印尼的 4 个地区代表 4 种景观, 研究了碳储量与区域发展效益的相互关系, 得出退耕还林可以促进区域可持续发展, 政策上应给予支持^[63, 64]。Swallow 等引入千年生态系统评估的思想和方法, 通过 Invest 模型对产沙量进行估算, 结合来自政府部门的农业产量和价格数据确定产量趋势, 基于农业生产的空间航拍数据, 对这些数据层进行叠加分析, 研究了土地利用变化、农业产值及产沙量的权衡协同关系^[65]。Watanabe 等从生物地球化学循环探索水、碳、氮价格对生态系统服务的影响^[66]。另外, 农田的扩张可以增大粮食产量, 但其导致的林地减少使固碳量减少, 温室气体排放增多, 比较不同区域造林固碳和粮食产量的经济价值, 可以很好地为土地利用分配提供参考^[67-70]。国外专家研究发现, 造林可以增加碳汇量, 调节气候规律, 在土壤侵蚀严重的区域可以起到土壤保持的作用^[71]。但是造林会增大蒸散量, 减少水径流量, 因此对不同区域需要根据碳价格和水价格比较两者之间价值, 确定造林面积。另外生物多样性与造林、产水量等也存在复杂的权衡协同关系^[72-76]。

国内在生态系统服务之间关系的研究近年来不断完善提升。不仅表明了生态系统服务对社会、经济、农业以及人文生活环境等都有巨大的影响^[77-80], 同时揭示了生态系统服务在近年来发生了巨大的变化。2001 年谢高地等对生态系

统服务价值评估方法进行了较全面的阐述总结^[81], 定量的评估为之后研究生态系统服务之间关系奠定了一定的基础。李云成等以三江平原为研究区域, 指出大量湿地被开垦为耕地, 导致土地退化和生态环境恶化, 需要对湿地保护和耕地开垦进行权衡^[82]。岳书平等基于东北样带 1976~2000 年土地利用类型数据, 结合研究区的实际情况, 运用中国陆地生态系统服务单位面积价值的平均值来分析研究区的生态系统服务价值 (ESV) 变化情况, 并进行了敏感性分析, 研究了土地利用变化对生态服务功能的权衡关系的影响^[83, 84]。吕昌河等以安塞县为例, 对土地利用变化与生态服务功能冲突进行了研究, 分析了坡地耕垦导致的粮食产量与水土流失之间的权衡关系^[85]。李屹峰等以密云水库流域为例, 利用 Invest 模型的“产水量”“土壤保持”“水质净化”三个子模型, 分析了土地利用变化对生态系统服务功能的影响, 得出应加强对森林和建筑用地的控制^[86]。潘影等以泾河流域 31 个县粮食供给、肉类供给、薪柴供给、水源涵养和土壤保持 5 项生态系统服务为研究对象, 采用物质质量评估法, 分析了五种生态系统服务的相互关系和空间差异性^[87]。从宏观角度上, 国内学者李鹏等^[88]、闵勇等^[89]、林泉等^[90]、李双成等^[91]、傅伯杰^[92]具体阐述了生态系统服务之间复杂的权衡和协同关系及机制, 概括了研究进展, 进行了未来展望, 并指出生态系统服务复杂关系研究的机遇、挑战与对策。这些研究涉及生态系统服务在净化环境、保持水土、生物多样性、大气气体含量平衡、减少温室气体效应、净化水质等方面为人类提供的各种生态系统服务。国内学者在生态系统服务方面做的各种研究贡献, 使我国对自身生态系统的现状有了全面且深入的认识, 逐渐提高了对生态系统的重视程度, 开始注重生态服务功能在未来发展中的重要地位, 采取退耕还林还草^[93, 94]、保护湿地等措施改善生态系统。

在权衡协同的研究方法上, 目前常用的有图形比较、情景分析及模型模拟等。其中, 情景分析是目前国际上研究生态系统服务之间权衡与协同关系最为常见的一种方法, 通过设定若干生态保护或社会经济发展优先或兼顾的情景, 分析各种生态系统服务之间的动态变化关系^[91, 95, 96]。基于土地利用类型构建未来情景, 在不同的土地利用类型基础上测算生态系统服务量并研究他们之间的变化, 探究生态系统服务之间的关系, 对未来土地利用的规划, 社会经济发展以及可持续发展具有重要意义^[97]。一般情况下, 保护情景以保护环境为首要目的, 有利于生态环境, 而开发情景往往有利于社会经济发展而忽略环境^[98]。土地利用类型变化影响生态系统服务, 而人口和经济的增长是生态系统服务变化最主要的驱动力^[99]。在研究生态系统服务时, 情景模拟是非常重要的方法^[100, 101]。随着人口激增、经济快速发展, 城镇化速度加快, 土地利用类型发生巨大转变, 尤其是城镇用地占用大量绿地, 必然会对生态环境产生破坏。如何权衡生态系统服务与人类发展之间的关系, 情景模拟的运用就显得尤为重要。