



黄土高原景观格局变化 与土壤侵蚀

傅伯杰 赵文武 张秋菊 刘 宇 等◎著



科学出版社

黄土高原景观格局变化 与土壤侵蚀

傅伯杰 赵文武 张秋菊 刘 宇 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

黄土高原是我国乃至全球土壤侵蚀最为严重的地区之一。本书基于景观生态学“格局-过程-尺度”理论,在系统分析小流域、县域和区域景观格局变化及驱动机制的基础上,应用实验监测和模型模拟等技术,探讨了坡面、小流域、流域不同尺度景观格局变化的水土流失效应,进行了流域尺度土壤侵蚀评价和土壤流失模拟,发展了基于土壤流失过程的景观格局指数表征方法,评估了黄土高原退耕还林还草对土壤侵蚀的影响效应。本研究对于深化景观格局与生态过程耦合、服务黄土高原生态建设实践具有重要意义。

本书可供从事景观生态学、自然地理学、水土保持、生态学等相关专业的科研人员 and 高等院校师生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀/傅伯杰等著. —北京:科学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-03-040214-1

I. ①黄… II. ①傅… III. ①黄土高原-景观格局-研究②黄土高原-土壤侵蚀-研究 IV. ①Q942.074

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 049007 号

责任编辑:彭胜潮 孙增英 / 责任校对:张小霞

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

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

*

2014 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 23 插页: 6

字数: 520 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

黄土高原是我国乃至全球水土流失最为严重的地区之一，该区大多数地区土壤侵蚀模数为 $5\,000\sim 10\,000\text{ Mg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，部分地区甚至超过了 $20\,000\text{ Mg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。严重的土壤侵蚀不仅加剧了该区生态环境的恶化，严重影响了当地经济的发展和人民生活水平的提高，而且导致大量泥沙进入黄河，给黄河下游地区带来了一系列的生态环境问题。造成该区土壤侵蚀严重的自然因素涉及降水集中、土壤疏松、破碎的地形和退化的植被生态系统等，而和人类活动密切相关的不合理土地利用是水土流失加剧的重要原因。

黄土高原地区的水土流失很早就引起了我国政府和许多国际组织的高度重视，投入了大量的人力、物力，研究水土流失的形成机理和综合治理措施。以中国科学院、水利部黄河水利委员会为主组织相关科研单位，于 20 世纪 50 年代和 80 年代先后对黄土高原地区开展了大规模的综合科学考察，研究了土壤、气候、水文、土地资源、水资源、动植物资源、土地利用、水土流失与社会经济发展等特点与变化规律，从不同时空尺度研究了水土流失的形成规律及其与不同环境因子之间的相互关系，初步探讨了小流域土地利用变化对水土流失的形成过程及其生态环境的影响。与此同时，从 20 世纪 70 年代，先后在黄土高原不同类型区设立了野外长期生态观测试验站，围绕不同类型区研究小尺度水土流失形成机理和旱地农业发展模式。并于 20 世纪 80 年代开始，以小流域为单元，开展了黄土高原综合治理试验与示范研究，提出了黄土高原地区水土流失综合整治的“28 字方针”，为大规模的综合治理和地区经济发展起到了积极推动作用。1999 年，国家实施退耕还林还草工程，在人工植被恢复的同时开始重视自然恢复的作用，使黄土高原局部水土流失得到一定控制，然而整个区域生态环境仍十分脆弱，区域生态系统和景观可持续性依然面临严峻挑战。

随着人类活动的日益加强，人类对全球生态环境的影响不断增强。研究人类活动胁迫下的生态环境变化成为全球地理学界关注的焦点和前沿，而作为具有自然和人文双重属性的土地利用/土地覆被，已成为全球环境变化研究的一个重要方面，得到许多国际组织的高度重视。土地利用/土地覆被变化作为景观动态的一个重要方面，在水土流失形成过程中起着十分重要的作用。应用景观生态学的理论与方法，将土地利用/土地覆被变化作为景观变化主要表征，研究坡面、小流域、流域、区域多尺度景观格局演变与土壤侵蚀空间分异的相互关系，揭示不同景观格局水土流失的形成过程与响应模式，通过调整现有的景观格局，重建和恢复合理的流域生态系统，将成为解决黄土高原土壤侵蚀的主要突破口，也将是控制黄土高原水土流失、改善区域生态环境、提高农民生活水平、实现区域可持续发展的关键。对于探讨黄土高原水土流失的控制方案和实现区域可持续发展具有十分重要的意义。

景观格局与生态过程的相互关系与耦合机制是景观生态学研究的核心科学问题，它

们相互作用表现出多种景观生态功能,理解格局与过程之间的关系是进一步深化景观生态学研究的关键。为了服务黄土高原生态建设需求,推动学科发展,在国家自然科学基金委员会(项目编号:40930528、90102018)和中国科学院的支持下,笔者及研究团队依托城市与区域生态国家重点实验室、中国科学院野外试验台站,基于景观生态学的“格局-过程-尺度”理论,在黄土高原坡面、小流域、流域、区域不同尺度开展了景观格局变化与生态过程的长期研究,取得了一系列研究成果。其中,部分成果已经在《黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程》一书中出版。本书是该书的延续,强调景观格局动态及其与土壤侵蚀的作用机理。全书在系统分析黄土高原不同尺度景观格局变化及其驱动机制的基础上,综合应用实验监测和模型模拟等技术,探讨坡面、小流域、流域不同尺度景观格局变化的水土流失效应,进行流域尺度土壤侵蚀评价和土壤流失模拟,发展了基于土壤流失过程的景观格局指数表征方法,评估了黄土高原退耕还林还草对土壤侵蚀的影响效应。本研究对于深化景观格局与生态过程耦合机制、服务黄土高原生态建设实践具有重要意义。

全书共分为12章。第1章基于国内外相关研究文献,系统分析和综述了景观格局与生态过程、景观格局变化及驱动力、景观格局变化与土壤侵蚀等研究进展;第2章以典型小流域为对象,基于农户调查数据和遥感影像资料等,分析纸坊沟小流域多时段土地利用格局变化过程及其驱动因素、小流域退耕还林还草工程与可持续发展;第3~4章针对县域尺度,在分析安塞县景观格局变化、耕地变化驱动力的基础上,探讨县域农业景观的生态可持续性、农业发展的可持续性;第5章针对区域尺度,分析延安市景观格局变化动态及其驱动因素、耕地变化动态及其驱动因素;第6章针对景观格局变化研究中的常见尺度效应问题,分别讨论耕地变化影响因素、景观格局指数测算和土地利用解译研究中的尺度效应;第7章以小区定位实验为基础,分析不同土地利用配置方式对径流、输沙和养分流失的影响效应;第8章以羊圈沟小流域为研究区域,分析景观格局变化背景下水土保持功能变化及其影响因素,并模拟分析水土保持功能的未来情景;第9章针对流域尺度,系统探讨降雨侵蚀力、地形因子和土地利用格局等景观因子变化对水土流失的影响效应;第10章在探讨流域/区域尺度降雨侵蚀力测算、覆盖与管理因子尺度上推的基础上,综合应用RUSLE和SEDEM模型,进行流域尺度土壤侵蚀评价和模拟;第11章针对土壤流失过程,提出多尺度土壤侵蚀评价指数,发展基于生态过程的景观格局指数表征方法,探讨土壤侵蚀评价指数的GIS实现技术及其在应用过程中的优点与不足;第12章以整个黄土高原为研究对象,基于土壤侵蚀模型评价黄土高原退耕还林还草对土壤侵蚀的影响和土壤保持量的变化。

全书由傅伯杰总体设计并拟定了章节内容。第1章由傅伯杰、赵文武、张秋菊撰写;第2章由张秋菊、傅伯杰、刘宇撰写;第3章由张秋菊、傅伯杰、徐海燕撰写;第4章由虎陈霞、傅伯杰撰写;第5章由张秋菊、傅伯杰、钟莉娜撰写;第6章由赵文武、钟莉娜撰写;第7章由靳婷、赵文武、冯强撰写;第8章由王朗、吕一河、刘宇撰写;第9章由赵文武、傅伯杰撰写;第10~11章由傅伯杰、赵文武撰写;第12章由刘宇、傅伯杰撰写。全书由傅伯杰、赵文武统稿。

景观格局与生态过程的耦合研究尚处于发展和完善之中,笔者希望本书出版在丰富

景观格局与生态过程耦合案例的同时，能引起学界对“格局-过程-尺度”研究理念的关注和兴趣，为从事景观生态学、自然地理学、水土保持、生态学等相关领域的科研人员、高校师生提供参考，共同推动我国景观生态学和相关学科的发展。同时，笔者也希望本书出版能够为我国黄土高原水土流失治理与生态环境建设提供可资的借鉴与参考。由于笔者水平所限和时间因素，不足之处敬请读者批评赐教。

傅伯杰

2013年9月于北京

目 录

前言

第 1 章 景观格局、过程与尺度	1
1.1 景观格局与生态过程	1
1.1.1 格局-过程-尺度	1
1.1.2 尺度效应与尺度转换	3
1.1.3 景观格局与生态过程耦合	10
1.2 景观格局变化及驱动力	12
1.2.1 景观格局变化分析	12
1.2.2 景观格局变化的驱动力分析	15
1.2.3 景观格局变化模拟	17
1.3 景观格局变化与土壤侵蚀	18
1.3.1 斑块尺度	18
1.3.2 坡面尺度	19
1.3.3 流域尺度	22
1.3.4 区域尺度	24
参考文献	26
第 2 章 小流域景观格局变化及其驱动力	37
2.1 自然与社会经济概况	37
2.2 多时段土地利用变化过程	39
2.2.1 土地利用结构变化	39
2.2.2 土地利用变化频度	41
2.2.3 土地利用变化流向	41
2.2.4 土地利用变化的坡度特征	43
2.3 土地利用格局变化的驱动力分析	44
2.3.1 数据来源与研究方法	45
2.3.2 土地利用格局变化的社会经济驱动	46
2.3.3 土地利用格局变化与主要自然因子的关系	49
2.3.4 土地利用格局变化的主要影响因素	52
2.4 小流域退耕还林还草工程与可持续发展	52
2.4.1 数据来源与研究方法	53
2.4.2 小流域农户基本情况	54
2.4.3 退耕还林还草政策对农户发展机会的影响	54
2.4.4 退耕还林还草政策对农户生产生活方式的影响	55

2.4.5 小流域可持续发展的潜在问题与路径选择	56
参考文献	57
第3章 县域尺度景观格局变化及其驱动力	59
3.1 景观格局变化分析	59
3.1.1 数据来源与研究方法	59
3.1.2 土地利用类型变化特征分析	63
3.1.3 土地利用空间格局的地形变化特征	65
3.1.4 土地利用空间格局的区位变化特征	68
3.1.5 景观格局变化特征与退耕政策	70
3.2 耕地变化的驱动力分析	71
3.2.1 数据来源与研究方法	71
3.2.2 指标标准化与共线性处理	72
3.2.3 驱动要素的典型变量与载荷	72
3.2.4 典型相关分析结果检验	73
3.2.5 驱动要素识别与政策启示	74
3.3 耕地生产与粮食自给能力区域差异分析	75
3.3.1 数据来源与研究方法	76
3.3.2 安塞县耕地和粮食单产变化	77
3.3.3 耕地面积变化的乡镇差异	78
3.3.4 耕地粮食生产力变化的乡镇差异	79
3.3.5 粮食自给能力的乡镇差异	79
3.3.6 退耕进度与基本农田建设布局	80
参考文献	81
第4章 县域尺度农业发展与景观可持续性	83
4.1 县域农业结构与发展途径分析	83
4.1.1 数据来源与研究方法	84
4.1.2 农业生态系统结构动态分析	85
4.1.3 农业发展途径动态分析	88
4.2 农业景观的生态可持续性评价	91
4.2.1 数据来源与研究方法	91
4.2.2 景观结构与人类影响度指数	93
4.2.3 农业景观变化的影响因素	94
4.2.4 农业景观生态可持续性	96
4.3 农业发展的可持续性评价	98
4.3.1 指标体系与评估模型	99
4.3.2 农业发展的可持续性	101
4.3.3 农业可持续发展的影响因素	109
4.3.4 退耕还林(草)对农业与农村经济发展的影响	112

参考文献	115
第 5 章 区域尺度景观格局变化及其驱动力	117
5.1 自然环境概况	117
5.2 区域景观格局演变特征分析	120
5.2.1 数据来源与研究方法	120
5.2.2 景观类型数量变化分析	121
5.2.3 景观类型变化方向分析	123
5.2.4 景观类型变化的空间分异规律	124
5.3 景观类型变化的驱动力分析	127
5.3.1 数据来源与研究方法	127
5.3.2 景观类型变化与社会经济因素的相关性分析	128
5.3.3 景观类型变化驱动因子的主成分分析	130
5.3.4 景观类型变化的社会经济因素驱动	131
5.4 区域耕地变化及其驱动力分析	132
5.4.1 数据来源与研究方法	133
5.4.2 延安市耕地变化特点	133
5.4.3 耕地变化驱动力分析	135
参考文献	137
第 6 章 景观格局变化研究中的尺度效应	139
6.1 耕地变化及其影响因素的尺度效应	139
6.1.1 数据来源与研究方法	139
6.1.2 耕地动态变化及其尺度变异	140
6.1.3 耕地变化影响因素及其尺度变异	142
6.2 景观指数的尺度效应	145
6.2.1 数据来源与研究方法	146
6.2.2 粒度变化对景观指数值的影响	146
6.2.3 比例尺对景观指数值的影响	150
6.2.4 景观指数测算的尺度特征	151
6.3 土地利用解译的尺度效应	152
6.3.1 数据来源与研究方法	152
6.3.2 数量结构差异比较	153
6.3.3 空间分布差异比较	154
6.3.4 土地利用解译的尺度特征	158
参考文献	158
第 7 章 坡面尺度土地利用格局变化与水土流失	160
7.1 实验布设与研究方法	160
7.1.1 实验布设	160
7.1.2 降水监测	161

7.1.3	产流量测算	162
7.1.4	产沙量测算	162
7.1.5	养分流失量测算	163
7.1.6	植被覆盖度估测	163
7.2	不同土地利用配置方式的产流变化	164
7.2.1	次降水变化下不同土地利用配置方式的产流效应	164
7.2.2	月降水变化下不同土地利用配置方式的产流效应	165
7.2.3	年降水变化下不同土地利用配置方式的产流效应	167
7.2.4	土地利用格局变化的产流特征	168
7.3	不同土地利用配置方式的产沙变化	169
7.3.1	次降水变化下不同土地利用配置方式的产沙效应	169
7.3.2	月降水变化下不同土地利用配置方式的产沙效应	171
7.3.3	年降水变化下不同土地利用配置方式的产沙效应	173
7.3.4	不同土地利用配置方式减流与减沙效应的比较	174
7.3.5	土地利用格局变化的产沙特征	175
7.4	不同土地利用配置方式的养分流失量变化	176
7.4.1	次降水变化下不同土地利用配置方式的养分流失效应	176
7.4.2	月降水变化下不同土地利用配置方式的养分流失效应	179
7.4.3	年降水变化下不同土地利用配置方式的养分流失效应	182
7.4.4	土地利用格局变化的养分流失特征	184
	参考文献	185
第8章	小流域土地覆被与水土保持功能模拟	186
8.1	数据来源与研究方法	186
8.1.1	研究区概况	186
8.1.2	数据获取	188
8.2	小流域水土保持功能变化	188
8.2.1	降雨侵蚀力因子(R)	188
8.2.2	土壤可蚀性因子(K)	190
8.2.3	坡长坡度因子(LS)	191
8.2.4	覆盖与管理因子(C)	192
8.2.5	治理措施因子(P)	193
8.2.6	水土保持功能时空变化	195
8.3	水土保持功能的主要影响因素	198
8.3.1	土地利用变化的影响	198
8.3.2	坡度空间分布的影响	200
8.3.3	降水量空间变化的影响	202
8.3.4	水土保持功能变化影响因素的综合分析	203
8.4	水土保持功能变化情景模拟	205

8.4.1 水土保持功能最大化模式	206
8.4.2 经济效益最大化模式	206
8.4.3 经济发展与水土保持功能权衡模式	208
8.4.4 可持续发展模式	208
8.4.5 气候变化背景下黄土丘陵小流域的生态治理	209
参考文献	210
第9章 流域尺度景观因子变化与水土流失	212
9.1 降雨侵蚀力因子与土壤流失	212
9.1.1 数据来源与研究方法	213
9.1.2 降雨侵蚀力重心的空间分布	215
9.1.3 土壤流失的年际变化	217
9.1.4 降雨侵蚀力重心变迁对土壤流失的影响	218
9.2 地形因子与水土流失	219
9.2.1 数据来源与研究方法	220
9.2.2 地形因子与径流量的相关性	220
9.2.3 地形因子与含沙量的相关性	222
9.2.4 地形因子与侵蚀模数的相关性	222
9.2.5 基于地形因子的水土流失评价模型	223
9.3 径流因子与土壤流失	224
9.3.1 数据来源与研究方法	224
9.3.2 径流量和输沙量的相关性分析	225
9.3.3 径流量和输沙量的关系模型	227
9.4 土地利用格局变化对降水-径流、径流-泥沙关系的影响	228
9.4.1 数据来源与研究方法	228
9.4.2 土地利用格局变化	230
9.4.3 土地利用格局变化对降水-径流关系的影响	231
9.4.4 土地利用格局变化对径流-泥沙关系的影响	233
9.4.5 土地利用格局变化对降水-径流-泥沙关系的影响特征	236
9.5 土地利用格局变化的水土流失效应	236
9.5.1 数据来源与研究方法	236
9.5.2 土地利用格局变化的时间段	239
9.5.3 土地利用格局的变化	240
9.5.4 水土流失效应的变化	240
9.5.5 土地利用格局变化对水土流失的影响特征	242
参考文献	243
第10章 流域尺度土壤侵蚀评价与模拟	246
10.1 流域/区域尺度降雨侵蚀力的简易算法	246
10.1.1 数据来源与研究方法	246

10.1.2	以 rain_9 为自变量的曲线拟合模型	248
10.1.3	以 $\text{rain}_{\text{month}}$ 为自变量的曲线拟合模型	256
10.2	覆盖与管理因子的尺度上推	263
10.2.1	数据来源与研究方法	263
10.2.2	降雨侵蚀力估算	266
10.2.3	土壤流失比率估算	267
10.2.4	区域覆盖与管理因子	270
10.3	基于 RUSLE 的流域尺度土壤侵蚀评价	271
10.3.1	数据来源与研究方法	271
10.3.2	降雨侵蚀力因子层	273
10.3.3	土壤可蚀性因子层	275
10.3.4	坡度坡长因子层	275
10.3.5	覆盖与管理因子层	277
10.3.6	土壤保持措施因子层	277
10.3.7	延河流域土壤侵蚀量	279
10.4	基于 SEDEM 的土壤流失模拟	280
10.4.1	SEDEM 模型简介	280
10.4.2	SEDEM 模型校正	284
10.4.3	SEDEM 模型应用	289
	参考文献	293
第 11 章	土壤侵蚀评价指数构建与应用	296
11.1	多尺度土壤侵蚀评价指数构建	296
11.1.1	多尺度土壤侵蚀评价指数的构建基础	296
11.1.2	坡面尺度土壤侵蚀评价指数	297
11.1.3	小流域尺度土壤侵蚀评价指数	301
11.1.4	流域尺度土壤侵蚀评价指数	303
11.1.5	多尺度土壤侵蚀评价指数	305
11.2	土壤侵蚀评价指数的 GIS 实现	306
11.2.1	降雨侵蚀力因子计算及 GIS 实现	306
11.2.2	覆盖与管理因子计算及 GIS 实现	307
11.2.3	地形因子计算及 GIS 实现	309
11.2.4	土壤可蚀性因子计算及 GIS 实现	310
11.2.5	多尺度土壤侵蚀评价指数计算及 GIS 实现	311
11.3	土壤侵蚀评价指数应用	312
11.3.1	数据来源与研究方法	312
11.3.2	土壤侵蚀评价指数测算	314
11.3.3	土壤侵蚀评价指数和 C 因子比较	317
11.3.4	土壤侵蚀评价指数的优点与不足	322

参考文献	322
第 12 章 黄土高原退耕还林还草与土壤侵蚀	324
12.1 黄土高原土地利用/覆被变化动态	324
12.1.1 黄土高原土地利用变化	325
12.1.2 黄土高原植被覆盖动态	329
12.1.3 黄土高原土地利用/覆被变化驱动力分析	333
12.2 土壤侵蚀定量方法与数据来源	335
12.2.1 模型结构	335
12.2.2 降雨侵蚀力因子	336
12.2.3 土壤可蚀性	336
12.2.4 地形因子	336
12.2.5 覆盖与管理因子	337
12.2.6 数据来源	337
12.3 黄土高原土壤侵蚀变化动态	337
12.3.1 黄土高原坡度分带	337
12.3.2 潜在土壤侵蚀变化	338
12.3.3 土壤现实侵蚀变化	340
12.3.4 土壤保持量变化	344
12.4 退耕还林还草对土壤侵蚀的影响	347
参考文献	349

彩图

第 1 章 景观格局、过程与尺度

1.1 景观格局与生态过程

“景观生态学”(landscape ecology)一词最早由德国地植物学家 C. Troll 于 1939 年提出,并于 20 世纪 60 年代在欧洲逐渐形成了一门新的发展中的学科。之后 40 余年间,随着地理学、生态学、系统科学等多学科的交叉、渗透和融合,逐渐成为现代生态学中内容最丰富、发展最快、影响最广泛的学科之一(傅伯杰等, 2001; 肖笃宁等, 2003; 王仰麟, 1998; 邬建国, 2000)。景观生态学作为研究空间格局和生态过程相互关系的科学(Pickett and Cadanasso, 1995),其研究内容包括景观结构、生态过程、景观动态、景观评价、景观规划等多个方面,其应用领域涉及土地持续利用、生物多样性、全球变化、生态恢复、城市规划、区域开发等多个领域(王军等, 1999; 邱扬和傅伯杰, 2000; 郭旭东等, 1999; 孟庆华和傅伯杰, 2000; 刘世梁和傅伯杰, 2001; 肖笃宁和李秀珍, 2003; 肖笃宁等, 2001; 李晓文等, 1999; Antrop, 2001; Makhzoumi, 2000),其中,景观格局、生态过程和尺度是景观生态学研究的核心内容。

1.1.1 格局-过程-尺度

1. 景观格局

景观格局(landscape pattern)一般指空间格局,是指大小和形状不一的景观斑块在空间上的配置(傅伯杰等, 2001)。景观格局的形成受自然环境、生物因素、人类活动等在不同尺度上的共同作用(Turner and Ruscher, 1988)。其中,气候、土壤、地形等非生物因素为景观格局提供了物理模板,种群动态、动物行为、生态系统过程等生物因素与人类活动(主要表现为土地利用)在此基础上的相互作用形成了多姿多彩的景观格局。

景观格局研究主要集中于两个方面:景观格局的描述(傅伯杰, 1995; 陈利顶等, 2001; 王仰麟等, 2000; 李秀珍等, 2004; Lausch and Herzog, 2002)和景观格局的动态变化分析(肖笃宁等, 1990; 张秋菊等, 2003; Zhou, 2000; Gautam et al., 2003; Antrop, 2004)。其中,景观格局描述是指采取景观指数或空间统计学方法,对景观中斑块数量、大小、形状、空间位置、分布类型、空间相关特征等进行定量分析,侧重于景观镶嵌体格局的空间特征分析。景观格局的动态变化分析,则重在分析景观格局在不同时期的变化及其驱动机制。景观格局在不同时期的变化特征可以通过景观格局指数与空间特征的比较、马尔柯夫转移矩阵、细胞自动机模型等来分析;景观格局驱动机制研究则往往通过主成分分析等统计方法来实现。

2. 生态过程

生态过程(ecological process)包括自然和人文两个方面(傅伯杰等, 2003; 王仰麟, 1998)。其中, 自然过程主要包括种群动态、种子或生物体的传播、捕食者和猎物的相互作用、群落演替、干扰传播、物质循环、能量流动等(邬建国, 2000), 是生物与非生物要素在时空尺度上的发展、变化、迁移与运动。生态过程中的人文方面是指人类社会的长期进化与发展所出现的人类活动与文化过程。人类活动与人类文明的发展, 一方面对自然景观产生了巨大破坏作用; 另一方面也将自然景观逐渐改造为有利于人类生存的空间格局(傅伯杰等, 2001)。

3. 尺度

尺度(scale)是自然科学和社会科学研究中的基本概念, 具有不同的定义方式(Gibson et al., 1998; Marceau, 1999; Jenerette and Wu, 2000; Withers and Meentemeyer, 1999; Peterson and Parker, 1998)。在景观生态学中, 尺度往往是指所研究客体或过程的时间维和空间维, 是某一现象或过程在空间和时间上所涉及的范围和发生的频率, 通常用粒度(grain)和幅度(extent)来描述(King, 1991)。空间粒度指景观中最小可辨识单元所代表的特征长度、面积或体积, 如最大分辨率或像元大小。时间粒度则指某一现象或事件发生的频率或时间间隔。幅度是指研究对象在空间或时间上的持续范围。尺度可以是绝对的(以空间和时间为单位), 也可以是相对的(如比率等)(Caldwell et al., 1993)。从尺度的本质特征来看, 尺度是有机体所感知的自然界固有的特征或规律(吕一河, 2001); 相应地, 尺度也可以分为本征尺度(也称现象尺度或特征尺度)和研究尺度(或测量尺度)两类, 也有学者将研究尺度细分为取样尺度和分析尺度(Dungan et al., 2002)。本征尺度根源于地球表层自然界的等级组织、空间异质性和复杂性(肖笃宁等, 2003), 揭示本征尺度特征是尺度研究的重点内容。

4. 格局-过程-尺度

格局、过程与尺度问题是景观生态学研究的核心问题之一(肖笃宁等, 2003; 傅伯杰, 2001; 王仰麟, 1998; 邬建国, 2000; Levin, 1992), 也是当前地理学、生态学研究的前沿领域。景观格局是不同生态过程与自然背景综合作用的结果, 生态过程的变化与发展影响和改变着景观格局的形成, 从某种意义上说景观格局是各种生态演变过程的瞬间表现。同时, 景观格局的空间分布能够从多个方面影响生态过程, 如景观格局的空间分布能够影响局域地表温度、养分丰缺、生物种群或其他物质在景观中的分布状况(Wang et al., 2003; Elkie and Rempel, 2001), 景观格局还可以影响景观中的有机体流、物质流和能量流(Pickett and Cadanasso, 1995), 也可以影响由非地貌因子引起的干扰在空间上的分布、扩散与发生频率等(傅伯杰等, 2001)。

景观格局、生态过程及其相互关系的研究离不开其研究尺度(Wu, 2000)。在景观格局分析中, 数据空间尺度不同, 其研究结果具有明显差异(Elkie and Rempel, 2001; Lioubimtseva, 2003; 赵文武等, 2003), 而这种空间尺度效应是粒度和幅度综合作用的结果(Turner

and Ruscher, 1988)。生态过程不同,其对应尺度也会有很大变化。就研究粒度而言,富营养化研究往往在 30 m 或更小粒度上展开,而森林砍伐的粒度则多在 100 m 以上(Buttenfield and Cameron, 2000);就研究幅度而言,叶片生理过程一般发生在平方毫米/平方厘米的空间尺度和秒/分钟的时间尺度上,而景观动态过程研究则需要考察几百/几千平方千米的空间尺度和十年/百年的时间尺度。景观格局与生态过程关系的研究也会因研究尺度的不同而发生明显变化。如对于土地利用结构与生态过程的关系而言,在不同尺度上,土地利用与土壤养分、土壤水分、水土流失的影响机制并不相同(傅伯杰等, 2003),中小尺度上的研究成果并不能满足大规模综合治理与开发的需求。景观格局与生态过程的研究,必须注意尺度的合理选择,因为研究尺度(粒度和幅度)决定着观察的对象(Meentemeyer, 1989),同一环境下不同粒度和幅度的研究结果往往存在较大差异。

过程产生格局,格局影响过程。若要正确理解格局与过程的关系,就必须认识其依赖的尺度。“格局-过程-尺度”逐渐形成新的科学范式,在地学、生态学等领域得到广泛应用。如生态水文学作为研究生态格局和生态过程变化的水文学机制的一门边缘学科,其重要研究方向是在不同时空尺度上和一系列环境条件下探讨生态水文过程(黄奕龙等, 2003);土壤科学也越来越多地将格局-过程-尺度的观点应用到土壤景观分析、水土流失、非点源污染等研究中(刘世梁和傅伯杰, 2001; 孟庆华和傅伯杰, 2000; 陈利顶等, 2002)。此外,格局-过程-尺度的观点在生物多样性、森林动态、土地可持续利用、土地利用/土地覆被变化等研究中(傅伯杰和陈利顶, 1996; 邱扬和傅伯杰, 2000; Rubiano, 2000; Rocco and Davide, 2012)也有着广泛应用。

“格局-过程-尺度”这一科学范式,与系统科学具有较大的关联性。系统科学认为,元素和结构是构成系统的两个缺一不可的方面,系统是元素和结构的统一(苗东升, 1998)。将该思想延伸到景观生态学中就是:景观要素及其空间组成是构成景观系统的基本条件,景观要素及其空间组成的有机统一则是景观结构的具体表现。在系统科学中,系统的物质流、能量流、信息流是影响系统功能和系统演化的基本条件,而这些系统流在景观生态学中则表现为具体的生态过程。尺度是等级层次理论和整体突现原理的具体体现,其中整体突现原理是把握层次概念的理论基础。系统的整体质是由元素相互作用而产生质的飞跃,在复杂巨系统中,从元素质到系统质的飞跃是经过一系列质变来实现,每发生一次部分质变,就形成了一个中间层次(苗东升, 1998)。对于尺度而言,具体表现为在不同尺度上所发生的景观格局和过程的关系并不一致,在一个尺度上的噪声成分,可能在另一较小尺度上表现为结构性成分(Burrough, 1983)。

1.1.2 尺度效应与尺度转换

随着研究尺度变化,景观格局和生态过程将发生变化,相应生态现象的规律性也会改变,进而影响对格局-过程相互作用机理的理解;相应地,某一尺度的作用机理不一定能直接应用到其他尺度。景观动态影响因子的组合及重要性排序也依赖于尺度(Vrieling et al., 2002),这些现象和尺度效应密切相关。尺度效应的根源在于研究对象本征尺度的差异。尺度效应分析主要是评价和理解尺度变化对研究结果的影响(Wu, 1999),如

随着尺度增加而造成景观格局的简单化、景观多样性的减少等 (Padgham and Webb, 2010)。尺度效应是导致景观格局与过程研究复杂化的重要因素之一 (Schneider, 2002), 它不仅依赖于事物的本身, 而且与整个环境或背景有关 (Mathieu and Anthony, 2006)。尺度不同, 生态过程的影响因子与作用机理也不相同。就水土流失过程而言, 不同尺度的水土流失影响机制并不相同 (傅伯杰等, 2003); 坡面、小流域与流域尺度上土壤侵蚀因子有明显差别 (Fu et al., 2006), 中、小空间尺度土壤侵蚀的宏观状态与地形变化关系密切, 而降水因素往往在相当大的空间尺度才表现为主导因子地位 (倪九派等, 2005); 微观尺度上的土壤侵蚀问题与物理学研究的对象几乎一致, 但空间尺度扩大到一定程度时, 原来的“机理”就模糊到一种几乎无法辨认的程度 (倪九派等, 2005); 随着研究尺度增大, 由于拦蓄作用的产生和增加, 径流量和泥沙含量一般都有降低趋势 (Wilcox et al., 2003); 运用土壤侵蚀模型 (LISEM) 预测径流量和土壤侵蚀量时, 随着时间步长和空间栅格尺度的增加, 预测值呈现减少趋势。因此, 选择合适的时空尺度显得非常重要, 否则可能造成较大的误差 (Rudi, 2005)。

尺度转换 (scaling) 是指在分析自然等级系统中不同时空尺度特征及其信息传递规律的基础上, 根据某一尺度的信息和知识来推测其他尺度上的现象 (Wu and Qi, 2000); 其核心内容是将一个尺度上或局部地区研究得到的景观格局与生态过程的关系, 合理拓展到其他尺度上, 便于人们了解生态现象的空间变化 (Dungan et al., 2002)。在这一过程中, 包含三个层次的内容: ①尺度的放大或缩小; ②系统要素和结构随尺度变化的重新组合或显现; ③根据某一尺度上的信息 (要素、结构、特征等), 按照一定的规律或方法, 推测、研究其他尺度上的问题 (赵文武等, 2002)。对于尺度转换的分类, 目前一般有三种分类方式。按照尺度转换的方向不同, 分为尺度上推和尺度下推, 前者是指将小尺度的信息推绎到大尺度上的过程, 是一种信息的聚合; 后者则是将大尺度上的信息推绎到小尺度上的过程, 是一种信息的分解 (Wu and Qi, 2000; King, 1991; Becker and Braun, 1999)。按照构建尺度转换模型的过程不同, 可分为显式尺度转换和隐式尺度转换 (Roland, 2000; Harald et al., 2000), 显式尺度转换是在数字集成或综合分析基础上, 在时间和空间尺度上对“局部”模型的响应进行尺度上推; 隐式尺度转换是指针对特定的环境条件, 在模型构建过程中将与尺度有关的特征要素考虑在内, 这样, 模型本身就体现了对模型时空粒度进行尺度转换的系统过程。在具体应用中, 显式尺度转换与隐式尺度转换的分类方法都出现在尺度上推的研究中。此外, 尺度转换根据所依据的时空纬度, 还可分为空间尺度转换和时间尺度转换 (Harald et al., 2000), 前者指在空间范围上进行, 后者指在时间幅度上开展。

尺度是整合地理学和生态学知识的核心轴线。景观生态学作为地理学、生态学的交叉学科, 有必要加强两项研究工作, 即尺度分析和尺度转换。依据研究对象的特点和研究手段的有效性, 选取适宜的研究尺度或尺度域进行尺度分析, 这是解决尺度问题的基础和起点; 在多尺度研究和尺度效应分析基础上进行尺度转换, 则是对研究对象充分理解和准确预测的关键。尺度效应是尺度转换研究的基础, 如果尺度转换研究忽视尺度效应, 而将局部瞬间的变量 (如碳吸收量) 直接用到区域或全球模型上去, 不仅会有累积误差, 而且也往往会导致错误的结论 (Gao et al., 2001)。