



区域生态环境遥感 监测与评估实践研究

卢远著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS
WWW.NEUP.COM

东北师范大学出版社

区域生态环境遥感 监测与评估实践研究

卢 远 著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NENUP.COM

东北师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

区域生态环境遥感监测与评估实践研究 / 卢远著. --
长春: 东北师范大学出版社, 2018.2
ISBN 978-7-5681-4196-3

I. ①区… II. ①卢… III. ①区域生态环境—环境遥
感—环境监测—研究 IV. ①X87

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 037294 号

☐ 策划编辑: 王春彦

☐ 责任编辑: 卢永康

☐ 封面设计: 优盛文化

☐ 责任校对: 李 密

☐ 责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春市净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

销售热线: 0431-84568036

传真: 0431-84568036

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbs@mail.jl.cn

河北优盛文化传播有限公司装帧排版

北京一鑫印务有限责任公司

2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

幅画尺寸: 185mm×260mm 印张: 14.5 字数: 395 千

定价: 52.00 元

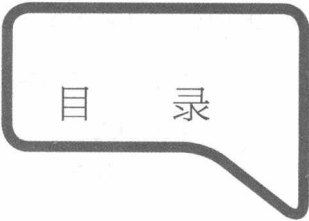
前言

随着人口数量的快速增长,人类活动对生态环境的干扰强度日益增大,生态系统潜在的脆弱性正逐渐转变成现实的环境灾害,土地盐碱化、草地退化、沙漠化、贫瘠化、湖泊萎缩、湿地退化等生态环境问题日趋严重,已严重影响了自然资源的永续利用和区域可持续发展。然而,生态环境是一个多因子、多层次、多变量的自然—社会—经济复合的大系统,采用传统方法很难揭示和解决其复杂的生态环境问题。遥感卫星对地观测具有独特的宏观、快速、动态和综合的优势,结合地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和全球定位系统(Global Positions System, GPS),遥感技术现已广泛应用于生态环境监测和评估领域。

本书作者多年从事生态环境遥感监测方面的研究,2001年9月—2005年6月在吉林大学环境与资源学院攻读博士学位,期间参加了国家自然科学基金“吉林西部盐碱土形成发展地球化学机制与荒漠化预警研究”(40273047)、吉林省科技攻关重点项目“吉林西部生态环境与综合修复技术研究”等课题研究;2005年7月—2007年12月在中国科学院成都山地灾害与环境研究所博士后流动站工作,参加国家重大科技项目“西藏自治区藏西藏南资源综合调查”,以及“西藏自治区土壤侵蚀遥感更新调查”“基于‘3S’技术的毒草调查研究”等科技攻关项目研究;2008年—2010年主持完成了国家自然科学基金“左江流域生态环境系统演变及优化调控研究”课题研究。在这些项目研究工作及相关课题研究中,在生态环境遥感监测领域积累了丰富的经验,发表了论文80余篇。

由此,本书作者在总结和归纳多年的科研经验与成果的基础上,以《藏北高原草地生态与生产力监测技术研究》和《吉林西部土地利用/土地覆盖变化及其生态效应研究》为案例,阐述了遥感技术作为主要研究手段,在土地退化监测、土地利用/土地覆盖变化分析、土地利用/覆盖变化的景观生态评价、土地利用变化定量分析、植被分类研究、区域生态系统生产力定量估测、区域植被变化分析等科研领域的应用。

本书的知识点除涉及遥感技术、遥感影像处理、光谱分解技术、MODIS数据、NDVI时序数据、GIMMS-NDVI数据等内容外,还涉及土地利用/土地覆盖变化(LUCC)、景观生态评价、能值理论、生态系统服务功能、植被分类、植被净初级生产力(NPP)等相关研究领域。本书可用于地理、遥感、生态、环保等相关专业本科、研究生学习和研究参考。



目 录

1 理论综述.....001

 1.1 遥感技术概述.....001

 1.2 草地遥感概述.....005

 1.3 遥感图像分类的一般方法.....020

 1.4 LUCC 研究理论、方法及其进展.....021

 1.5 景观生态学的基本理论.....030

 1.6 能值理论与方法.....037

 1.7 生态系统服务功能及其价值评估.....041

 1.8 净初级生产力（NPP）.....047

2 土地退化的遥感动态监测研究.....054

 2.1 土地盐碱化遥感动态监测.....055

 2.2 线性光谱分解技术土地退化监测中应用.....065

 2.3 基于 MODIS 数据的土地退化宏观评估.....070

 2.4 小结.....077

3 土地利用 / 土地覆盖变化分析.....078

 3.1 土地利用 / 土地覆盖的遥感制图.....078

 3.2 土地利用 / 覆盖变化的图谱模型.....085

 3.3 区域 LUCC 的图谱特征分析.....087

 3.4 小结.....099

4 土地利用 / 覆盖变化的景观生态评价101

 4.1 景观格局分析的指标体系101

 4.2 LUCC 景观格局动态分析106

 4.3 小结118

5 区域农业生态系统能值变化分析119

 5.1 区域农业生态系统能值分析方法119

 5.2 区域农业生态系统能值动态分析126

 5.3 小 结136

6 生态系统服务功能变化的价值评估138

 6.1 生态系统服务功能价值评估方法138

 6.2 生态系统服务价值评估结果与分析144

 6.3 小结152

7 基于 TM 影像的藏北高原毒草监测方法研究154

 7.1 草地类型信息的提取156

 7.2 毒草信息的提取161

 7.3 小结167

8 基于 MODIS 时序数据的植被分类研究168

 8.1 遥感数据及处理168

 8.2 植被分类过程170

 8.3 结果分析174

 8.4 小结176

9 基于 MODIS 数据的区域植被生产力定量估测177

 9.1 NPP 的空间格局特征177

 9.2 NPP 的季节动态178

 9.3 不同类型植被的 NPP 特征179

 9.4 主要草地类型 NPP 的验证180

 9.5 小结180

10 基于 GIMMS-NDVI 数据的区域植被变化分析.....182

10.1 植被变化遥感监测概述182

10.2 遥感数据及分析方法183

10.3 植被的 NDVI 变化特征.....188

10.4 植被 NDVI 退化的空间特征分析.....195

10.5 小结.....204

参考文献.....205

附录216

附录 I 吉林西部能值计算的基础数据.....216

附录 II 吉林西部能值计算的基本公式.....220

1.1 遥感技术概述

1.1.1 遥感信息科学的内涵

遥感信息科学主要研究遥感信息形成的波谱、空间、时间及地学规律,研究遥感信息在地球表层的传输和再现规律(徐冠华,1996)^[10]。遥感信息技术为地学提供了全新的研究手段,标志着地学信息获取和分析处理方法的一场革命。和传统的对地观测手段相比,遥感信息的优势表现在:能够提供全球或大区域精确定位的高频度宏观影像,从而揭示了岩石圈、水圈、气圈和生物圈的相互作用和相互关系;扩大了人的视野,从可见光发展到红外、微波等波谱范围,加深了人类对地球的了解;在遥感与GIS基础上建立的数学模型为量化分析奠定了基础;在一些地学研究领域促进了以定性描述为主到以定量分析为主的过渡,同时实现了空间和时间的转移,空间上野外部分工作转移到实验室,时间上从过去、现在的研究发展到在三维空间上定量地预测未来。随着计算机技术、网络技术、通信技术的迅速发展和遥感信息科学本身的发展,这种影响的广度和深度将不断深入。特别值得一提的是,遥感信息科学对地球系统科学的形成和发展起了重要的推动作用。

遥感信息科学与生态学相互交叉渗透产生了一门生态学的新分支学科——遥感信息生态学,旨在研究生态学各个层次上的遥感信息产生的机理、生态学效应及其应用的系统理论和方法。它通过建立各种遥感模型和以遥感数据为输入变量的生态学模式,研究生态学各层次的结构、功能和过程及遥感信息技术所产生的效应,其产生是遥感技术和生态学深入发展和相互结合的必然结果。该学科的理论、方法和思路为草地遥感科学的提出、发展和完善奠定了良好的方法论和理论基础。

1.1.2 遥感信息源及其特征

遥感信息是指以光学或者电磁波为载体,经介质传输而由航空或航天遥感平台所收集到的反映地球表层系统现象的空间信息(陈述彭,1991)^[1]。对于一个连续、开放、完整、复杂的地球系统而言,遥感信息是地表目标离散化、特征化的信息,是通过遥感系统对地表的成像过程获得反映地面物理、化学、几何、生物及相关地学特征等属性的信息。遥感信息具有多源

性、宏观性、周期性、综合性和量化等特点。由于地球系统的复杂性和开放性，遥感信息在进行地学空间分析和过程反演中具有模糊性和多解性的特点（陈述彭，2000）^[2]。

遥感是从空间感知地面的特征和变化，其范围可从全球到实地不同的细节层次间变化。在遥感影像分析中，分辨率（resolution）是一个至关重要的概念，并具有多重含义。图像分辨率简单来说就是成像系统对图像细节分辨能力的一种度量，也是图像中目标细微程度的指标，它表示地物信息的详细程度。遥感影像分辨率通常分为如下几类：空间分辨率、光谱分辨率、辐射分辨率、时间分辨率等，分别反映了遥感影像在不同方面的特征。

空间分辨率又称地面分辨率，是遥感传感器所能分辨的地面最小目标的大小。辐射分辨率是指图像的每一波段的像元的亮度值范围，即遥感在接收目标辐射的信号时，能分辨的最小的辐射度差异，或是对两个不同的辐射源的辐射量的分辨能力，能分辨的辐射度差越小，辐射分辨就越高。光谱分辨率是指遥感器在接收目标辐射的光谱时，能分辨的最小的波长间隔，或是指对两个不同辐射源的光线波长的分辨能力，能分辨的波长间隔越窄，光谱分辨率就越高。遥感传感器所用的波长数目、波段、波长及波段亮度决定了遥感器的光谱分辨率。时间分辨率是指对同一地区遥感影像重复覆盖的频率。不同的传感器具有不同的时间分辨率，其时间分辨率从每 15 分钟一次（静止气象卫星）到几天或几周不等。如陆地卫星的时间分辨率为 16 天。极轨气象卫星，如 NOAA 和风云一号的时间分辨率为一天两次，GMS 静止气象卫星数据为每 15 分钟一次，而风云二号则为每半小时一次。不同的时间分辨率具有不同的应用范围，如土地利用 / 土地覆盖信息获取，所需的时间分辨率要求以年际为周期，而农作物估产则要求以天为周期，灾害和气象监测则要求以小时为周期。灰度分辨率是影响遥感影像可判读性的重要因素之一，它反映了可以从图像的灰度差别鉴别具有不同散射特性的分布目标的能力。遥感影像的分辨率是进行土地利用 / 土地覆盖信息获取中最优先考虑的重要因素之一，不同目的信息获取可以选择不同的遥感信息源，以达到最大限度满足信息获取需求的目的。

随着遥感技术的迅猛发展，遥感影像已经被广泛地应用于土地利用 / 土地覆盖的制图及动态变化监测。土地利用 / 土地覆盖信息的获取主要依赖于遥感信息源，目前，常用的卫星数据主要有：① Landsat MSS/TM//ETM 影像、SPOT 卫星影像、CBERS 等陆地资源卫星，此类遥感数据分辨率较高，能对土地覆盖进行详细的调查、分析和评价，并提供较为详细的资料；② 气象卫星数据，以 NOAA 气象卫星的超高分辨率辐射计（AVHRR）数据和 EOS 卫星的中分辨率成像光谱仪（MODIS）数据为代表，这类数据具有高宏观性和较高的时间分辨率，为宏观的土地利用 / 土地覆盖变化监测创造了条件；③ 航空遥感和小卫星高分辨率遥感数据，如航片、QuickBird 数据、IKNOS 数据等（见表 1-1）。

表 1-1 几种常用传感器对地观测波段的特征及其用途

传感器	波段范围 /mm	空间分辨率	覆盖范围	时间周期	主要用途
Landsat MSS	0.50 ~ 0.60	79 m	扫描宽度： 185 km	16 天	水深、水色
	0.60 ~ 0.70				植被、土壤
	0.70 ~ 0.80				植被、水体
	0.80 ~ 1.20				岩石、植被、土壤

续 表

传感器	波段范围 /mm	空间分辨率	覆盖范围	时间周期	主要用途
Landsat- TM/ ETM	0.45 ~ 0.52	30 m	扫描宽度： 185 km	16 天	水深、水色
	0.52 ~ 0.60	60 m/120 m 30 m			水色、植被状况
	0.63 ~ 0.69				叶绿素、居住区
	0.76 ~ 0.90				植物长势
	1.55 ~ 1.75				土壤和植物水分
	10.4 ~ 12.4				云及地表温度
	2.05 ~ 2.35				岩石类型
SPOT-HRV	0.50 ~ 0.59		20 m	每台 HRV 扫描宽度： 60 km，两台 实际扫描宽 度：117 km	26 天
	0.61 ~ 0.68	10 m	叶绿素、居住区		
	0.79 ~ 0.89		植物长势		
	0.51 ~ 0.73		制图		
	(全 色)				
NOAA/AVHRR	0.58 ~ 0.68		1.1 km	扫描宽度： 2 400 km	0.5 天
	0.72 ~ 1.10	植物、水陆边界			
	3.55 ~ 3.93	热点、夜间云			
	10.3 ~ 11.3	云及地表温度			
	11.5 ~ 12.5	大气及地表温度			
EOS - MODIS	0.620 ~ 0.670	250 m	扫描宽度： 2 350 km	0.5 天	土地覆盖边界
	0.841 ~ 0.875	500 m			土地覆盖特征
	0.459 ~ 0.479				
	0.545 ~ 0.565				
	1.230 ~ 1.250				
	1.628 ~ 1.652				
	2.105 ~ 2.115				

注：参考（郇建国，2000；孙家柄，1997）^[4, 5]。

各类遥感数据一般具有以下特征（陈俊，宫鹏，1998）^[3]：

1. 遥感技术的发展增大了观测的范围。随着遥感技术的发展，以前无人到达的地区，可以利用遥感技术探测那里的资源环境特征，开阔了人类的视野。
2. 能够提供大范围的瞬间静态图像。任何自然现象均处于动态变化过程中，由于人类对地球观测的局限性，在有限时间内，利用有限的精力和财力开展宏观的过程研究困难相当大，遥感技术大大提高了资料获取的效率。
3. 遥感技术提供了大面积重复观测的可能性，为多时段的对比研究和动态分析提供了基础。航天遥感的发展，一颗人造卫星可以在 16 天时间内覆盖地球表面一周，随着更多的人造地球卫星的投入应用，可以大大缩短遥感影像的获取周期。
4. 随着多光谱扫描仪的研制成功和在遥感上的推广应用，拓宽了人类观测地球的光谱能力。

5. 可以提供高分辨率的资料。一般的航空相片的空间分辨率可以达到厘米或者毫米级别,常用的 TM 影像和 SPOT 图像空间分辨率可以达到 30 m 和 20 m。

1.1.3 遥感影像处理方法

地学研究表明,诸如植被、土壤、土地利用等各种自然和人文现象的分布都兼有结构与随机性的特性,可以用区域化变量的空间分布来表征。由于遥感影像集中体现了地表现象在某个瞬间的波段特性,因而地表现象所固有的结构性和随机性会不同程度地反映在图像上。自 1972 年美国发射第一颗对陆地观测卫星以来,遥感影像已被广泛应用于土地利用/土地覆盖的制图及动态变化监测。土地利用/土地覆盖信息提取的方法有两大类:一类是目视解译;另一类是计算机分析技术。目视解译的方法费时费力且所得结果会因解译者不同而差异很大。近年来,随着计算机软硬件功能的加速增长,计算机图像分析技术成为广为使用的方法。因此,研究区域土地利用/土地覆盖变化最好使用遥感和数字图像分析技术(倪绍祥,1998)。常用的数字图像处理方法有几何校正、图像镶嵌、图像合成、图像增强及图像分类等(孙家柄,1997)。

1.1.3.1 几何校正与影像镶嵌

遥感影像的几何校正就是从具有几何变形的图像中消除变形的过程,产出一幅符合某种地图投影或者图形表达的新图像。图像的几何校正一般步骤如下:① 确定校正方法,根据遥感影像几何畸变的性质和可用于校正的数据确定几何校正的方法;② 确定校正公式,确定原始图像上的像素和几何校正后的图像上的像素之间的变换公式,并选择控制点等数据确定变换公式中的未知参数;③ 对原始图像进行重采样,得到消除几何畸变的图像。在图像几何校正中,通常采用多项式方法进行图像校正,灰度值的常用内插方法有三次卷积法、双线性内插法或最邻域内插法。

影像镶嵌是将两幅或多幅遥感影像拼在一起,构成一幅整体图像的技术过程。在土地利用/土地覆盖制图中,为了获取更大范围的区域卫星影像,需要将多幅(景)遥感影像拼成一幅影像图。影像镶嵌前提是影像的几何校正。

1.1.3.2 图像合成

图像合成是利用计算机提供的多通道存储器,选取同一地区的几个波段图像分别存放在红色、绿色和蓝色通道中,并依照彩色合成原理,分别对各通道中的图像进行单色变换,形成红、绿、蓝基色图像,进而叠加形成一种彩色图像的过程。若通道中图像波段与进行基色变换的波段一一对应时,合成图像为天然(真)彩色图像,如 LANDSAT 卫星的 TM3、TM2、TM1 波段按 RGB 方式合成得到的图像;若打破这种合成彩色的对应关系,则得到的合成图像为假彩色合成图像,如 LANDSAT 卫星的 TM4、TM3、TM2 波段按 RGB 方式合成得到的图像。在合成过程中,有时为了不同的用途和目的,可以对图像进行比值处理、加值处理、差值处理等各种处理,以得到反映不同地物信息的图像。

1.1.3.3 图像增强

图像增强的目的在于改善图像的质量,以利于信息的提取和识别。从方法上说,则是摒弃

一些认为不必要或者干扰的信息,而将所需要的信息得以增强显示。图像增强的方法有多种,如对比度增强和局部信息增强。对比度增强是通过增强影像特征在灰度上的分配范围,从而增强影像信息的可视性。对比度增强能够放大影像光谱特征的微小差别,消除大气对影像质量的影响,从而为判读和解译提供基础。常用对比度增强方法有线性拉伸技术和直方图拉伸技术。

图像局部信息增强,也称为滤波,主要是根据特定像元及其周围像元的灰度,通过一定的数学模式,对遥感影像进行灰度赋值。遥感影像经过滤波后,原来的灰度发生变化,主要目的是:①校正和恢复由于传感器无法正常工作导致的影像信息丢失;②增强影像所反映的地物信息;③通过滤波处理,从遥感影像上直接提取地物信息。常用的滤波方式主要有空间滤波、低通滤波、中通滤波、高通滤波。

1.1.3.4 多波段分析

地物分类的主要依据是地物的光谱特征,即地物图像高密度的多光谱量测值。然而就某些指定地物而言,由原始多波段图像量测值所组成的模式并不能很好地表达地物的类别特征。这就要求依据原始的多波段图像,经过一定处理、变换重新形成一组能够更有效描述类别特征的信息模式。目前常用的多波段分析方法有:①比值处理,主要是为了消除地形因子对影像的影响;②植被指数,主要用来反映地表植被的生长状况及病虫害情况;③多波段散点图分析,通过多波段的散点图分析,可以区分出不同地物类型;④主成分分析(Karhunen Leove, K-L变换),基于变量(多波段图像)之间的统计特征,在尽量不丢失信息的前提下利用正交线性变换实现图像数据的压缩,消除原始多波段图像之间的相关性,并使图像的特征信息得到增强;⑤缨帽分析(K-T变换),由美国 Kauth 和 Thomas 提出的一种线性变换,这种变换得到的特征图像的坐标轴指向的不是主成分方向,而是指向与植物生长和土壤相关的方向,K-T变换可以实现信息压缩,又可以帮助分析农业特征;⑥信息融合,将不同来源的遥感数据在统一的地理坐标系中,采用一定的算法生成一组新的信息或合成图像的过程,常用信息融合算法有 HIS、小波变换等。

1.2 草地遥感概述

1.2.1 草地遥感的含义

草地遥感是研究现代遥感技术和地理信息系统(GIS)技术与草地科学相结合而应用于草地生产全过程的一门新型边缘交叉学科。它是草地科学和技术的一个分支,是草地信息科学的重要组成部分,具有农学、生物学和遥感科学的时间属性、空间属性和信息属性(李建龙,1997)^[8]。具体来讲,草地遥感是专门研究以对草地初级、次级生产系统进行实时监测、管理和预测预报与行为决策为目标,运用草地和遥感信息理论,采用现代信息技术,对各种草地信息和活动进行获取、存储、管理、分析与应用,最终得到所需的新信息和手段,为草地决策服务的科学。目前,遥感技术所渗透的有关草地学科领域主要有:草地土壤科学中的土壤分类与

调查、土壤含水量监测和干旱预报；草地类型科学中的草地调查与分类判读、草地学中资源动态监测和产量预报；草地生态科学中的信息监测与信息系统建立、草地演替变化过程监测与分析；草地农业生态科学中的草畜平衡监测和管理决策、草地生态效益评估、全球环境变化监测、草地植保中某些病虫害的调查与预防、草地自然灾害（雪灾、火灾和水灾）预警系统建立以及草地环境保护等学科。因此，归根到底，草地遥感就是研究草地学各个层次上的遥感信息产生的机理、草地学意义及应用的理论和方法。草地遥感为草地学和草地生态学等学科提供了全新的研究手段和技术，导致草地科学中许多分支学科研究范围、内容和方法发生了重要变化，也标志着草地科学信息获取和分析处理方法的一场革命以及一门新兴前沿、交叉学科的兴起，这具有重要的科学意义和广阔的应用前景。

1.2.2 草地遥感的理论基础

1.2.2.1 草地光谱特征

草地光谱特征是草地遥感的基础。草地光谱反射规律是草地植被、土壤、大气、地形、地带性和水分含量等多种因素的影响而形成的综合反映。光谱反射率大小受到草地类型、种类组成、植被盖度、叶绿素含量、植物水分、土壤物理特征、大气状况等多种因素的影响。第一，草地光谱反射率具有明显的日变化规律，它随着太阳高度角的变化而呈规律性的变化，随着早晨—中午—下午的时间变化，出现明显的波动—稳定—波动变化，草地光谱反射率观测应在中午 14 时左右进行。第二，草地光谱反射率具有明显的季节变化特征，据刘富洲（1985）和黄敬峰（1993）^[9] 研究表明，草地植被光谱反射率具有明显的季节变化特征，草地植物的生育期不同，其光谱反射率也不同；草地植被盖度大小对光谱反射率也有明显的影响，随着盖度的增大，草地植被对光谱反射率的作用成正比；由于草地种类组成不同，在不同的发育季节，其光谱反射率会有一定的差异；草地植物叶片的形状、大小和着生位置对草地群落光谱反射率大小也有一定的影响，这就为利用遥感植被指数信息监测草地动态变化提供了条件和基础。第三，草地植被具有渐近光谱反射特征规律，即指草地植被的光谱反射率开始时随草地植被生物量和盖度的增加而增大，但当生物量和盖度增加到一定程度后，随着生物量和盖度的再增大草地光谱反射率却不再增加，而是趋于一个常数。因此，要提高草地生物量的精度，就要找出光谱渐近线的“阈值”。第四，草地牧草产量与遥感植被指数间具有明显的相关性，大量研究证明，比值植被指数 RVI 和归一化植被指数 NDVI 对绿色植物变化灵敏，对土壤或枯草不灵敏，能够较好地反映出牧草的覆盖度、生物量和叶面积指数变化，与地上现存净初级生物量有较好的相关关系。一般情况下，RVI 和 NDVI 与地上牧草生物量存在显著的非线性相异性，这为草地动态监测和估产提供了依据和指标。研究还表明，MSS、TM、SPOT 和 NOAA/AVHRR 遥感资料在草地调查和分类，产量估测和预报，旱灾、火灾、雪灾、病虫害实时监测等方面，具有明显优势，其应用潜力巨大。

1.2.2.2 草地生态系统的原理

草地生态系统是指自然与经济的综合体，草地植被是在一定环境下长期形成的自然体，其

生长受气候、地貌、土壤和水文等诸多因素的约束(董永平, 2005)^[11]。同时, 草地又是人类经营的自然资源, 其生产力和可利用条件是人们关心的首要问题。草地具有个体、种群、群落、生态系统、景观、区域和全球变化这些不同的尺度和层次上的划分。由于草地状况和其他生物、非生物因素的变化使草地生态系统处于动态变化之中, 这种动态变化存在于草地生态系统不同的层次结构中, 在不同时间、空间尺度下有复杂的机制和规律。要达到对草地生态系统和草地资源的合理管理, 就必须对草地生态系统的现状、演变历史以及发展趋势进行深入的了解, 以期对政策调控、农业区划、草地建设、退化草地恢复等提供基础信息, 因而, 草地资源监测是草地生态系统研究的重要内容。

草地生态学是研究草地生物与其环境之间的相互关系的科学, 草地生态系统是草地生态学研究的高级阶段, 它重点研究草地各种非生物因素(如气候、土壤、地形等)、生物因素和社会经济劳动因素之间的相互关系, 主要探讨草地资源在一定时空和水热条件下, 以土壤—植物—动物这一能量、物质转化系统为主干的基本规律, 探求草地发生发展规律, 并运用这一规律在保持草地生态平衡的同时, 不断地提高草地生产的整体效应。特别是在生态系统和全球范围尺度上去研究草地动态变化, 仍用传统方法则不能胜任, 而用草地遥感科学的方法和技术, 从宏观上和综合性上去研究遥感信息以何种载体(电磁波、图像、数学、数学模型等)来传递、存储、表达草地生态系统信息, 研究如何从这些载体中提取草地生态学各层次中有关结构、功能和演替过程等具有生态学意义的信息, 并研究它们应用的途径, 从而促进草地生态学和草地生产的发展。由于草地生态系统内部各子系统之间能量与物质的交换, 决定了其各自组织特性, 而各子系统之间彼此影响, 密切相关, 处于动态开放式的变化过程中, 这就为利用遥感和 GIS 技术相结合监测草地生态系统的变化规律, 乃至对全球植被变化进行研究, 提供了研究的对象和目标。

1.2.2.3 草地植被的地带性分布规律

在草地植被与自然条件(包括水、热、土壤地形等因素)的关系中, 自然条件起着主导作用, 它决定着牧草的生存生长、影响着不同地区牧草的种类和数量。经过长期的自然选择, 在特定的自然条件下, 形成了由一定植物种类组成的草地植被类型。不同的草地植被类型反映着不同的自然环境条件, 草地资源由于受不同时空条件下的水热、地形等因素的影响, 呈现出明显的地域分异规律和特征。

我国植被的分布可分为东南部和西北部两大部分。东南半部属于森林植被区, 地跨热带、亚热带、暖温带、温带等温度带, 分布着与此相对应的各类森林。这些森林因长期遭受自然或人为因素的破坏, 发育为草丛、灌草丛植被, 表现出由南向北的纬向地带性规律, 相应地, 草地分布也由南向北表现出纬向地带性规律。在北热带—南亚热带分布着以龙须草、黄茅、白茅、五节芒等热带性灌草丛草地; 在中亚热带—北亚热带分布着以野古草、金茅、芒、黄背草、细柄草等热性灌草丛草地; 而在暖温带分布着以荆条、酸枣、白羊草等为建群种的暖性灌草丛。

我国西北半部的植被分布与水分状况的地带性分布相一致, 自东向西呈现倾斜的经向地带性分布, 依次为草甸草原、典型草原、荒漠草原、草原化荒漠和荒漠植被, 与此相对应, 分布相应的草原类型。青藏高原气候以高寒、强大陆性为主体, 水分状况则由东南向西北递减, 高原植被亦体现出特殊的高原地带性分布规律, 植被分布依次为高寒草甸、高寒草原、高寒荒

漠。草原的分布也与之一致，以高寒草原类为主要特征，局部地区如藏南谷地分布一些以长芒草、三刺草、白草、固沙草为主的温性草原，以及以戈壁针茅、沙生针茅、短花针茅为优势植物的温性荒漠草原^[11]。

植被除了以上水平地带性的变化外，还有垂直地带性的变化和隐域性分布，这种变化构成了草地的垂直分布和隐域性分布。总体来看，草地植被的水平、垂直地带性也表现在草原类型的分布规律上，两者基本上是一致的。

1.2.2.4 植被净初级生产力

植被作为陆地生态系统的重要组成部分和核心环节，在地表与大气之间能量、物质与动量交换中扮演着重要角色。植被净初级生产力（Net Primary Productivity, NPP）作为表征植物活动的关键变量，是陆地生态系统中物质与能量运转研究的重要环节，其研究将为合理开发、利用自然资源和对全球变化所产生的影响采取相应的策略和途径提供科学依据。1995年7月的《Science》发表了一组题为生物学和生态学前沿的专题论文，提出包括生产力生态学和生态系统生态学在内的6个方面是全球生态学界关注的焦点。自从荷兰瓦格宁根学派的创始人 Dewit 在 20 世纪 60 年代发现植物同化率同水分蒸散有直接关系以来，不同类型自然植被和农作物生产力的估算一直是植物生态学家所关注的问题，当前生产力机理模型又成为生产力生态学的研究热点^[12]。

植被净第一性生产力是植物自身生物学特性与外界环境因子相互作用的结果，它是评价生态系统结构与功能特征和生物圈的人口承载力的重要指标。地区性乃至世界性生物生产力及其空间分布的知识，能使人类得以从宏观区域上做出如下估计：潜在的粮食资源的地理分布，人为提高区域性生产力水平的限度，不同国家和地区可能和现实的生产力水平，即区域生态系统的最大容纳量等。对植被的净初级生产力的测算最早可以追溯到 19 世纪 80 年代 Ebermayer 对巴伐利亚森林物质生产力的测定，但是大规模的世界范围内的工作则开始于 20 世纪 60 年代。特别是国际生物学计划（IBP）以来，研究生物生产力为核心的生产力生态学成为生态学的热点，进行了许多 NPP 的测定，并以测定资料为基础，联系环境因子建立了各种模型^[13]。

草地生态系统是全球陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一，在全球碳循环和气候调节中起重要作用。我国拥有极为丰富的草地资源，分布自东北平原，越过大兴安岭，经辽阔的内蒙古高原，而后经鄂尔多斯高原、黄土高原，直达青藏高原南缘，绵延约 4 500 km，南北跨越 23 个纬度（陈佐忠等，2002）^[14]。草地生态系统不仅是我国分布面积最广的生态系统类型之一，而且对发展畜牧业、维持生物多样性、保持水土和维护生态系统平衡方面有着重要作用（谢高地等，2001）^[15]。但目前有关陆地生态系统 NPP 及动态变化的研究大多数侧重于森林植被方面，在草地植被方面的研究却相当薄弱。为此，开展草地植被净初级生产力估测研究，对合理开发草地资源以及研究陆地生态系统的碳循环具有重要意义。

1.2.3 草地遥感的发展现状

1.2.3.1 国外研究进展

20 世纪 80 年代初，国外许多国家开始将改进的高分辨率辐射仪（AVHRR）资料应用于草

地资源监测与估产^[16]。如美国利用遥感资料估测了内布拉斯加沙漠化地区的 5.2 万平方千米的草场变化情况,为生产上合理利用草地提供了科学依据。McDanieln 和 Haas (1982)^[17] 使用资源卫星的 MSS 资料发现,在北美的牧豆树禾草草原上,其绿色植被指数 (GVI) 与植被的鲜重、风干重以及老植被盖度密切相关,他们的结论是可以从 MSS 的资料上得到草地植被状况的定量化数据。20 世纪 80 年代中期, B. F. Taylor (1985)^[18] 采用 NOAA 资料计算的归一化植被指数 NDVI 来监测新西兰的草地生产力的动态变化,发现牧草生长末期的地上生物量与 NDVI 密切相关, NDVI 和 RVI 与绿色生物量有很好的相关性; NDVI 在木本植物覆盖率小于 10% 时,可提供直接监测总产草量的方法; NDVI 反映了该地区年内及年际间降水变化的特征,可监测草地条件,确定草地初级生产力减少的区域; NDVI 还可用于反映生长季节及年际或更长时间的降水和土壤水分的变化,并可估测各类植被的物候期。G. J. Tucker 等 (1985, 1986)^[19] 多次收集了撒哈拉地区雨季或生长季的 AVHRR 资料,发现 NDVI 与牧草生长末期地上总生物量之间密切相关, NDVI 和 RVI 与绿色生物量有很好的相关性。Langran (1985)^[20] 在圣蒙特海兰斯矿区的第一及第二废弃带上,用热红外多光谱扫描仪 (TIMS) 影像监测了植被的再生状况。Green (1986)^[21] 使用 SIR-A 雷达影像发现,当南澳大利亚灌丛草地的大部分植被处于非生长期且光谱均一时, SIR-A 雷达影像可以用反射率作为灌丛盖度的替代值。由于灌木插花出现,灌木盖度与反射率不能直接联系, S. W. TODD (1998) 利用 TM 图像提取植被指数,如 GVI (Green Vegetation Index)、NDVI、WI (Wetness Index) 和红色波段 (TM3) 研究了美国科罗拉多东部地区的牧草生物量,发现这些植被指数与牧区草地生物量呈线性关系,而对于非牧区,它们之间却没有密切的相关性。日本的 Hirolazu YAMAMOTO (2000)^[23] 利用 NOAA 数据和野外实测数据估算了内蒙古地区的草地生物量,并发现 NDVI 和植被盖度 (VCR) 与草地生物量有密切的相关性,并建立了 NDVI 和 VCR 与草地生物量的一元线性回归模型,且此模型对草地生物量的监测误差小于 10%。Shoshany 等^[24] (1996) 以 TM 数据为资料,在植被盖度与地表反射特性之间建立经验关系模型,估测地中海半干旱区灌木草地的植被盖度,为实现区域尺度上植被生产力定量化提供了可能。Gabriele 等^[25] (2003) 利用 TM 卫星数据估测了意大利山区草地生态系统的生物量。

在草地资源管理与评估方面,由于草地生态系统具有明显的季节性和地域性,因此草地经营管理者可根据不同的精度要求,从合适的高度航天航空飞行器上,利用多光谱数据和图像处理系统编制各地不同的草地植被分布图,并应用于各地区的草地管理、规划和草地基本状况评估。如 Graetz 和 Ludwing (1978)^[26] 等曾利用 NOAA/AVHRR 资料研究澳大利亚大范围放牧退化现象。Tuner (1989)^[27] 应用陆地卫星资料,评价了澳大利亚新南威尔士半干旱疏林草地的质量。Prince 和 Astle (1986)^[28] 发现, MSS7 与 MSS5 的比率可用于建立其与草地覆盖、草地生物量之间的关系。Paruelo 和 Golluscio (1994)^[29] 利用 MSS 影像快速地评估了阿根廷西北部的草地,发现遥感是评估植被单元分布不可多得的工具。Merrill 等^[30] 发现 MSS 影像数据只能提供大范围内植被生物量,不能胜任精确估算。相比之下, TM 影像的七个波段涵盖了更宽广的光谱区域,大多数草地覆盖类型都可以从 TM 长光谱波段的雨季图像上区分出来^[31]。Saltz 等^[32] 评价了 TM 遥感影像在研究放牧影响中的作用,断定 TM 影像可以探测植被随时间变化,但在超干旱区却并不能直接提供植被指数。Girard 等^[33] 利用地面辐射数据及 SPOT 数据区分了草地质量,显示了

SPOT 影像在评估草地质量及监测草地变化方面的潜力。

综上所述,借助遥感技术监测草地资源、评估草地植被状况已成为国际草地科学研究中的前沿课题,同时对确定合理载畜量、加强草场的科学管理也具有重要的实用价值。

1.2.3.2 国内研究进展

遥感技术在草地科学中的应用在我国起步较晚,但发展较快,已成为草地科学中一个比较活跃、成果丰硕的前沿研究领域之一。在草地科学中,遥感技术首先在草地资源调查中得到广泛应用。遥感技术的应用大大提高了草地资源调查与制图的精度,促使草地分类由定性逐渐走向量化,节省了大量人力、物力和财力。特别是结合国家“六五”“七五”攻关项目——“三北”防护林遥感综合调查在新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、山西等地区开展工作以来,把遥感技术在草地资源调查、分类和制图中的应用推向了一个新的高潮。该项目结合“三北”防护林遥感调查,基本查清了调查区草地资源的类型、分布、质量、面积和利用现状及草地与环境演变状况,揭示了草地退化、沙化、盐碱化的趋势,为合理利用、开发和经营草地资源提供了科学依据,取得了巨大的社会效益。

近年来,随着航空、航天对地监测技术的不断发展,利用卫星资料为数据源对草地资源变化进行监测的研究越来越多。如徐希孺等(1985)^[35]研究了用 NOAA 资料推断内蒙古自治区锡林郭勒盟草场产草量的方法。丁志、童庆禧(1986)^[36]用气象卫星图像资料进行了塔里木河中、下游地区草场生物量测量方法的研究。樊锦沼和吕玉华等(1990)^[37,38]应用同步观测的 NOAA 卫星资料与草地产量资料进行相关分析,动态监测和预报了内蒙古呼伦贝尔市草地的牧草产量变化,建立了估产模型。李博等^[39]借助 RS、GIS 和 GPS 的独特功能,利用气象卫星 NOAA、GMS 双星遥感信息对内蒙古锡林郭勒盟草畜平衡进行了动态监测与大面积估产,并进行草地畜牧业动态监测系统建设研究,在软件和监测技术系统开发、各信息系统的接口、草地资源数据库和估产模型建立、草地生产力空间分布格局分析等方面取得了丰硕成果,使草地资源动态研究水平达到一个新的高度。黄敬峰、王秀珍等及李建龙^[40-44]等充分发挥“3S”技术的优势,对复杂地形条件下的天山北坡中段天然草地牧草产量遥感动态监测方法进行了研究,建立了不同草地类型的遥感动态监测模式和综合荒漠、草原、草甸资料的遥感动态监测模式;利用 1986 和 1987 年 NOAA/AVHRR 资料,研究新疆不同类型天然草地归一化差植被指数(NDVI)与比值植被指数(RVI)的特征,确定各类草地的返青期,对比分析了积累 NDVI 与牧草产量的关系;并利用 1991—1994 年 NOAA/AVHRR 资料建立了新疆北部各地天然草场光谱监测模型、卫星遥感监测模型与预测模型,为建立草地遥感监测业务服务体系奠定了基础。内蒙古大学王艳荣等(2001)^[45]对内蒙古草原的地面光谱特征进行了深入研究。甘肃草原生态研究所遥感室对新疆阜康市等地区草地资源成功地进行了从初级生产到次级生产的系列动态监测、产量分级和大面积估产等,已取得了可喜进展。王兮之等(2001)^[46]还利用 AVHRR 资料提取了甘南全州的 NDVI 植被指数,结合实际采样观测,构建了甘南草地生产力估测模型。卢玲等(2005)^[47]利用光能利用率模型 C-FIX,高时空分辨率的 SPOT Vegetation 数据,全球格网化气象再分析资料以及土地利用图,估算 1998—2002 年黑河流域不同生态系统的净初级生产力。