

西北地区生态环境与作物长势遥感监测丛书

黄土高原近30年植被覆盖及其气候变化响应

常庆瑞 谢宝妮/著



科学出版社

西北地区生态环境与作物长势遥感监测丛书

黄土高原近 30 年 植被覆盖及其气候变化响应

常庆瑞 谢宝妮 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对黄土高原植被覆盖及其变化,应用多源遥感数据和地理信息系统技术,系统研究了近30年来黄土高原植被覆盖及其对气候变化的响应。主要内容包括:黄土高原植被覆盖、初级生产力和物候的时空变化,主要气候要素——气温、降水量的空间分布和演变规律,植被覆盖与气候变化之间的相互关系及其响应机制,人类活动和自然因素对黄土高原植被变化影响程度的定量评价。

本书可供地球科学、遥感、生态环境等学科领域的科技工作者使用,也可供高等院校地理学、资源环境、水土保持和遥感技术专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土高原近30年植被覆盖及其气候变化响应 / 常庆瑞, 谢宝妮著. —北京: 科学出版社, 2019. 6

(西北地区生态环境与作物长势遥感监测丛书)

ISBN 978-7-03-061670-8

I. ①黄… II. ①常… ②谢… III. ①黄土高原-植被-覆盖-研究 ②黄土高原-气候变化-研究 IV. ①Q948.524②P467

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第116831号

责任编辑: 李轶冰 / 责任校对: 樊雅琼
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张: 14 1/2

字数: 300 000

定价: 158.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

| 前 言 |

西北农林科技大学“土地资源与空间信息技术”研究团队从20世纪80年代开始遥感与地理信息科学在农业领域的应用研究。早期主要进行农业资源调查评价,土壤和土地利用调查制图。20世纪90年代到21世纪初,重点开展了水土流失调查、土地荒漠化动态监测、土地覆盖/变化及其环境效益评价。最近10多年,随着遥感技术的快速发展和应用领域的深入推广,研究团队在保持已有研究特色基础上,紧密结合国家需求和学科发展,重点开展生态环境信息精准获取与植被(重点是农作物)长势遥感监测研究工作,对黄土高原生态环境和西北地区主要农作物——小麦、玉米、水稻、油菜和棉花等生长状况遥感监测原理、方法和技术体系进行了系统研究,取得了一系列具有国内领先水平的科技成果。

本书是研究团队在黄土高原生态环境遥感监测领域多年工作的集成。先后受到国家高技术研究发展计划(863计划)课题“作物生长信息的数字化获取与解析技术”(2013AA102401,2013~2017年)、国家科技支撑计划课题“旱区多遥感平台农田信息精准获取技术集成与服务”(2012BAH29B04,2012~2014年)、国家自然科学基金项目“黄土高原植被恢复对土壤有机碳影响机理及其储量估算研究”(30872073,2009~2011年)等项目的资助。

本书在这些项目研究成果的基础上,总结、凝练研究团队相关研究生学位论文和多篇公开发表的学术论文,由常庆瑞、谢宝妮撰写而成。内容以黄土高原植被和气候为核心,应用多源遥感数据和地理信息系统技术,系统研究了近30年来黄土高原植被覆盖、初级生产力和物候的时空变化,主要气候要素——气温、降水量的空间分布和演变规律,探讨了植被覆盖与气候变化之间的相互关系及其响应机制,定量评价了人类活动和自然因素对黄土高原植被变化的影响程度。

第1章:概括介绍研究背景、目的和意义,以及黄土高原植被覆盖变化和驱动力研究进展,分析研究存在的问题与不足,提出本书的主要内容和框架结构;第2章:介绍黄土高原基本概况,数据来源及处理方法;第3章:LTDR NDVI数据在黄土高原的适用性评估,通过对LTDR与GIMMS、Landsat遥感卫星数据NDVI产品静态数值、动态变化的一致性比较,确定LTDR NDVI数据用于黄土高原植被覆盖提取的精度和误差,以及植被覆盖变化监测的适用范围;第4章:应用小波变换、多分辨率分析方法,研究黄土高原植被覆盖的时空特征,不同气候

区、不同植被类型 NDVI 年际变化和年内分布，黄土高原植被覆盖的多尺度分辨率变化，以及不同气候区、不同植被类型 NDVI 多尺度变化特征，黄土高原植被覆盖变化趋势的空间特征；第 5 章：在分析黄土高原气温和降水的年内分配、年际变化特征基础上，揭示黄土高原年平均气温和年降水量、季节平均气温和降水量的周期性变化，确定不同气候区、不同季节气温和降水量变化的周期与尺度，黄土高原气温、降水量及其趋势的空间变化特征；第 6 章：通过分析黄土高原植被及其变化趋势与地理环境的关系，黄土高原不同气候区、不同植被类型季节 NDVI 与同季气候、前季气候的关系，确定 NDVI 与气候关系的空间变化和黄土高原植被变化主要气候影响因子，以及 NDVI 对气温和降水的滞后响应；第 7 章：在分析黄土高原植被初级生产力（NPP）时空分布和物候期空间格局、年际变化基础上，探讨 NPP 与物候期时空变化的影响因素，及其与气候的相互关系；第 8 章：通过研究气候变化和人类活动影响下黄土高原不同气候区、不同植被类型和不同行政区植被覆盖的变化趋势及其空间分布，应用残差分析法，确定气候变化和人类活动对植被变化影响的相对贡献。

参加本书基础工作的团队成员如下。作者：常庆瑞、谢宝妮；研究团队成员：刘梦云、齐雁冰、高义民、陈涛、刘京、李粉玲；博士研究生：赵业婷、王洋、申健、秦占飞、郝雅璐、刘秀英、宋荣杰、王力、郝红科、班松涛、蔚霖、黄勇、塔娜、落莉莉；硕士研究生：刘海飞、马文勇、刘钊、王路明、白雪娇、郝雅璐、班松涛、张昶、侯浩、姜悦、刘林、李志鹏、孙梨萍、章曼、刘佳歧、张晓华、尚艳、王晓星、袁媛、刘森、于洋、高雨茜、马文君、殷紫、严林、李媛媛、孙勃岩、罗丹、王烁、李松、余蛟洋、由明明、张卓然、武旭梅、王琦、徐晓霞。在近 10 年的野外观测、室内分析、数据处理、资料整理、报告编写和论文撰写过程中，团队成员和研究生们风餐露宿、挥汗如雨、忘我工作、无怨无悔。在本书出版之际，对于他们的辛勤劳动和无私奉献表示衷心的感谢！

由于作者学术水平有限，加之科学技术发展日新月异，新理论、新方法、新技术不断涌现，书中难免存在不足之处，敬请广大读者和学界同仁批评指正，并予以谅解！

常庆瑞

2019 年初夏

于西北农林科技大学雅苑

| 目 录 |

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景、目的和意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 黄土高原植被覆盖变化遥感研究	2
1.2.2 黄土高原植被覆盖驱动力研究	6
1.3 存在问题与不足	10
1.4 研究内容	11
1.4.1 LTDR NDVI 数据在黄土高原适用性评估	11
1.4.2 黄土高原植被覆盖时空变化特征	11
1.4.3 黄土高原气候时空变化特征	11
1.4.4 黄土高原植被覆盖与气候变化的关系	12
1.4.5 黄土高原植被 NPP 和物候变化及其影响因素	12
1.4.6 气候变化和人类活动对黄土高原植被影响的贡献	12
1.5 技术路线	12
第 2 章 材料与方法	14
2.1 研究区概况	14
2.2 数据来源及处理	16
2.2.1 NDVI 数据	16
2.2.2 气象数据	19
2.2.3 植被类型数据	20
2.2.4 地形数据	20
2.3 数据处理	20
2.3.1 气象数据处理	20
2.3.2 LTDR NDVI 数据处理	22
2.3.3 NDVI 与气候年际变化	23
第 3 章 LTDR NDVI 数据在黄土高原的适用性评估	25
3.1 引言	25
3.2 研究方法	25

3.2.1	数据预处理	25
3.2.2	LTDR NDVI 与 GIMMS NDVI 一致性对比方法	26
3.2.3	LTDR NDVI、GIMMS NDVI 与 Landsat NDVI 一致性对比方法	27
3.3	LTDR NDVI 与 GIMMS NDVI 一致性比较	28
3.4	LTDR NDVI、GIMMS NDVI 与 Landsat NDVI 静态数值一致性 比较	31
3.5	LTDR NDVI、GIMMS NDVI 与 Landsat NDVI 动态变化一致性 比较	33
3.6	讨论与结论	35
3.6.1	讨论	35
3.6.2	结论	37
第 4 章	黄土高原植被覆盖时空变化特征	38
4.1	引言	38
4.2	研究方法	39
4.2.1	小波分析	39
4.2.2	多分辨率分析	40
4.3	黄土高原植被覆盖的年内变化特征	43
4.4	黄土高原植被覆盖的年际变化特征	46
4.4.1	不同气候区植被 NDVI 年际变化	46
4.4.2	不同植被类型 NDVI 年际变化	51
4.5	黄土高原植被覆盖的多尺度分辨率变化特征	59
4.5.1	不同气候区植被 NDVI 多尺度变化特征	59
4.5.2	不同植被类型 NDVI 多尺度变化特征	63
4.6	黄土高原植被覆盖的空间变化特征	67
4.6.1	NDVI 均值的空间变化特征	67
4.6.2	NDVI 趋势的空间变化特征	71
4.7	讨论与结论	74
4.7.1	讨论	74
4.7.2	结论	77
第 5 章	黄土高原气候时空变化特征	79
5.1	引言	79
5.2	研究方法	79
5.3	黄土高原气温和降水量的年内变化特征	80
5.4	黄土高原气温和降水量的年际变化特征	81

5.4.1	年平均气温和年降水量的年际变化	81
5.4.2	季节平均气温和降水量的年际变化特征	84
5.5	黄土高原气温和降水量的周期性变化特征	92
5.5.1	年平均气温和年降水量的周期性变化	92
5.5.2	季节平均气温和降水量的周期性变化	97
5.5.3	不同气候区季节平均气温和降水量变化周期	106
5.5.4	不同季节气温和降水量变化主周期尺度	108
5.6	黄土高原气温和降水量的空间变化特征	112
5.6.1	气温和降水量均值空间变化	112
5.6.2	气温和降水量趋势空间变化	115
5.7	讨论与结论	119
5.7.1	讨论	119
5.7.2	结论	122
第6章	黄土高原植被覆盖与环境 and 气候变化的关系	123
6.1	引言	123
6.2	研究方法	124
6.2.1	NDVI 与地理环境的关系	124
6.2.2	NDVI 与气候的关系	124
6.3	黄土高原植被变化与地理环境的关系	125
6.3.1	NDVI 均值与地理环境的关系	125
6.3.2	NDVI 趋势变化与地理环境的关系	127
6.4	黄土高原植被 NDVI 变化与同季气候的关系	128
6.4.1	不同气候区 NDVI 与同季气候的关系	128
6.4.2	不同植被类型 NDVI 与同季气候的关系	132
6.4.3	NDVI 与同季气候关系的空间变化	134
6.4.4	黄土高原植被变化主要气候影响因子	138
6.5	黄土高原植被季节 NDVI 与前季气候的关系	141
6.5.1	不同气候区 NDVI 与前季气候的关系	141
6.5.2	不同植被类型 NDVI 与前季气候的关系	143
6.5.3	NDVI 与前季气候关系的空间变化	146
6.6	黄土高原 NDVI 对气温和降水量的滞后响应	148
6.6.1	不同气候区 NDVI 对气温和降水量的滞后响应	148
6.6.2	不同植被类型 NDVI 对气温和降水量的滞后响应	150
6.7	讨论与结论	156

6.7.1	讨论	156
6.7.2	结论	159
第 7 章	黄土高原植被生产力和物候变化及其影响因素	161
7.1	引言	161
7.2	研究方法	162
7.2.1	数据来源	162
7.2.2	NPP 变化趋势计算	163
7.2.3	物候期提取	164
7.2.4	物候趋势计算	164
7.2.5	物候与气温和降水量的关系计算	164
7.3	黄土高原植被 NPP 时空变化	165
7.3.1	黄土高原植被 NPP 年际变化	165
7.3.2	黄土高原植被年均 NPP 空间变化	166
7.4	黄土高原植被物候期变化	168
7.4.1	植被物候期空间格局	168
7.4.2	植被物候期年际变化	169
7.5	黄土高原植被 NPP 与物候变化的影响因素	171
7.5.1	植被 NPP 变化的影响因素	171
7.5.2	黄土高原物候变化与气候的关系	177
7.6	讨论与结论	179
第 8 章	气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖的贡献	181
8.1	引言	181
8.2	研究方法	181
8.2.1	残差分析法	181
8.2.2	人类活动和气候变化对植被覆盖影响的相对贡献率	182
8.3	气候变化和人类活动影响下植被覆盖的变化趋势	183
8.3.1	植被 NDVI 趋势空间变化	183
8.3.2	不同气候区植被 NDVI 趋势变化	184
8.3.3	不同植被类型 NDVI 趋势变化	185
8.3.4	不同行政区植被 NDVI 趋势变化	189
8.4	气候变化和人类活动对植被变化影响的相对贡献率	194
8.4.1	相对贡献率空间变化	194
8.4.2	不同气候区相对贡献率变化	195
8.4.3	不同植被类型相对贡献率变化	197

8.4.4 不同行政区相对贡献率变化	201
8.5 讨论与结论	203
8.5.1 讨论	203
8.5.2 结论	205
参考文献	207

第 1 章 | 绪 论

1.1 研究背景、目的和意义

黄土高原位于我国中部腹地，矿产资源丰富，是我国重要的能源和化工基地，在国民社会经济发展和生态环境中有着重要的战略地位。然而黄土高原地处半湿润区向干旱区过渡地带，黄土土层较厚，雨水资源稀缺，风力和水力侵蚀严重，生态环境十分脆弱和敏感。植被对该区生态环境起着关键作用（Zhou et al., 2006），植被是连接土壤、大气、水文及其他生态要素的重要“纽带”，植被通过改变地表反射率和下垫面粗糙度以达到减缓径流冲蚀、风力侵蚀和保持水土的作用。因此，研究黄土高原植被覆盖状况可更好地理解黄土高原陆地生态系统现状及各生态要素的循环机制（Cao and Woodward, 1998a）。

近年来全球气候变化剧烈，联合国政府间气候变化专门委员会（The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第五次全球气候变化报告（IPCC, 2013）指出，近 30 年平均气温为过去 1400 年来的最高水平，降水在湿润区进一步增加，干旱区进一步减少，极端降水频率增加。在这些气候大背景下，黄土高原年平均气温自 20 世纪 60 年代到 21 世纪初上升了 1.91°C ，年降水量下降了 29.11 mm （Wang et al., 2012）。气候剧烈变化，会对植被生长环境产生影响，进而影响植被的物候、分布及生长状况，从而影响生态系统物质能量转换和碳循环。一般认为气候因素是影响植被生长的主要因素，但人类活动在特定条件下也会对植被覆盖产生决定性影响。黄土高原自 1999 年开始实施退耕还林还草工程，2000 ~ 2008 年黄土高原林地和草地面积增加了 12%，农用地面积减少了 11%（贾小旭，2014），植被覆盖改善明显。因此研究该区植被生长与气候变化和人类活动的关系对理解该区植被对气候和人为活动响应机制及未来气候—植被预测模型研究具有重要的生态学意义。

随着遥感科学和生态学的发展，已有学者对黄土高原植被覆盖动态变化（Liu et al., 2007；郭敏杰，2014；何远梅，2015；李正国等，2005a, 2005b；刘咏梅等，2011；刘志红等，2011；罗隆诚，2012；夏露等，2008；湛青青，2014；张宝庆等，2011；张翀和任志远，2011）、植被生长对气温和降水的响应

(Xie et al., 2015; Zhang et al., 2006; 陈安安等, 2011; 程杰, 2011; 何远梅, 2015; 李斌和张金屯, 2003a, 2003b; 任培贵, 2014; 邵薇薇等, 2009; 信忠保等, 2007; 许炯心, 2005; 张翀等, 2012; 张东海等, 2013; 张建香, 2013), 以及人类活动对植被覆盖的影响 (Feng et al., 2013; 孙建国等, 2014; 张倩, 2014) 等科学问题进行了探索和研究, 并取得了一定的进展。然而, 黄土高原位于气候过渡带, 不同气候条件下植被覆盖变化及其对气候变化的响应会有差异。另外, 在进行植被—气候关系研究中, 季节因素也会影响两者的关系 (Piao et al., 2004)。因此, 关于不同时间和空间尺度黄土高原植被对气候和人类活动响应的规律和机制还需进一步探讨。

本研究以黄土高原植被覆盖为主要研究对象, 利用 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 最新发布的归一化植被指数数据集和气象插值数据, 以植被和气候的时空动态变化为切入点, 探究黄土高原不同气候区和生物群落尺度植被覆盖变化及其对气候变化的响应, 并在此基础上分析气候变化和人类活动对植被覆盖变化影响的相对贡献率。在气候暖干化和实施大规模植被恢复措施背景下, 深入定量研究黄土高原不同时间和空间植被与气候变化及植被与气候和人类活动之间的关系, 对明确该区植被、气候和人类活动之间的相互影响机制, 评价退耕还林还草这一重大生态工程措施的实施效果及未来制定科学合理的生态环境系统建设和恢复措施有着重要的科学指导意义, 也可为全球变化研究中植被—气候预测模型提供理论依据。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 黄土高原植被覆盖变化遥感研究

绿色植被的光谱反射率与其他土地利用类型 (如水体、裸露地表或冰雪) 差异较大, 植被的反射光谱在近红外波段高而在可见光波段低。近几十年来, 随着遥感科学的不断发展, 利用植被这一反射光谱特征构建植被指数, 对绿色植被长势进行监测, 在全球、大陆及区域尺度得到广泛应用。目前, 最常用的植被指数为归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI), 由近红外波段和红外波段的差值与这两个波段之和的比值得到。植被指数一般表示植物的光合作用活性 (Myneni et al., 1995), 因此较密集或高覆盖率的植被通常植被指数较高。

自 20 世纪 80 年代开始, 全球尺度卫星遥感数据快速发展和积累, 不同平台、不同分辨率的卫星遥感数据使大范围、长时间监测植被覆盖变化成为可能。

目前, 常用于植被覆盖研究的传感器平台有以下几种:

1) NOAA/AVHRR。NOAA 的气象卫星 AVHRR (advanced very high resolution radiometer) 自 20 世纪 80 年代发射以来, 获取全球每日遥感影像, 为监测地球大气、海洋、植被和陆地属性提供了非常有用的光谱信息。目前, 共有 3 代 AVHRR 传感器: AVHRR/1 (4 个波段, 1979 ~ 1994 年, 装载于 NOAA-6、8 和 10 卫星); AVHRR/2 (5 个波段, 1981 ~ 1999 年, 装载于 NOAA-7、9、11 ~ 14 卫星) 和 AVHRR/3 (6 个波段, 1999 年至今, 装载于 NOAA-15 ~ 19 卫星) (Alcaraz-Segura et al., 2010)。AVHRR NDVI 数据是目前能够覆盖全球且时段最长的连续 NDVI 数据集, 并因此得到广泛应用 (杜加强等, 2014)。由于 AVHRR 传感器最初设计为气象卫星, 具有空间分辨率低、波段较宽易受水汽干扰、缺少机载校准、受卫星轨道漂移影响等不足, 因此进行植被动态研究并不理想。许多研究团队为了减少传感器、光照及大气等影响, 使用不同的处理流程, 基于 AVHRR 数据研制开发了众多全球 NDVI 数据集, 应用较为广泛的有: 探路者数据 (AVHRR Pathfinder) (James and Kalluri, 1994)、GIMMS 数据 (Global Inventory Modeling and Mapping Studies)、FASIR 数据 (Fourier-Adjustment, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed) (Los et al., 2000) 及 LTDR 数据 (Land Long Term Data Record) (目前最新的数据集) (Pedelty et al., 2007)。

2) Terra-Aqua/MODIS。Terra 卫星是美国第一颗地球观测卫星 (上午星), 1999 年 12 月发射, Aqua 是第二颗地球观测卫星 (下午星), 2002 年 5 月发射。MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 是这两个卫星上搭载的传感器, 有 36 个波段。因其波段较窄, 云检测和大气校正与 AVHRR 相比较精确。MODIS 的分辨率也比 AVHRR 传感器高, 分别为 250 m、500 m 和 1 km, 可更为精细地研究植被动态变化。但由于发射时间较晚, MODIS 的观测时间较短。

3) SPOT/VGT。VGT (VEGETATION) 传感器是搭载在 SPOT-4 卫星上的植被观测传感器, 1998 年 4 月发射, 提供覆盖全球的植被观测数据, 有 3 个用于植被监测的波段, 提供 10d 合成的 1.1 km、4.4 km 和 8.8 km 不同分辨率的 NDVI 数据。SPOT VGT 的观测时间也较短。

基于这些 NDVI 数据集, 不同的学者在全球、陆地和区域尺度分别对地表植被覆盖动态变化进行了研究。Myneni 等 (1997) 是首次使用遥感数据对大范围植被覆盖进行研究的学者, 他们利用 AVHRR Pathfinder 和 GIMMS 两种 NDVI 数据集对 1981 ~ 1991 年 22.75°N 以北地区的植被覆盖动态变化进行了研究, 得出北半球植被覆盖在这 10 年间伴随着生长季的延长呈增加趋势, 在 45°N ~ 75°N 纬度范围植被覆盖增加明显, 可能因为同期春季温度上升显著。Zhou 等 (2001) 在 Myneni 等研究基础上, 使用 GIMMS NDVI 数据集对 1981 ~ 1999 年 25°N 以北

大陆地区的植被覆盖变化进行了研究,发现欧亚大陆植被 NDVI 增加趋势比北美稍大,约 61% 的区域生长季 NDVI 呈现增加趋势,其中,58% 为森林和灌木植被。北美 NDVI 增加区域较为破碎,主要分布在东南部的森林和中西部的草地。全球部分地区 NDVI 呈下降趋势,位于阿拉斯加、加拿大北部及亚洲东北部,可能因为气温升高引起干旱加剧。此外,其他学者也得出与上述学者相似的结果 (Slayback et al., 2003; Tucker et al., 2001; Zhou, 2003)。Piao 等 (2011a) 在上述研究的基础上,使用 GIMMS NDVI 数据对欧亚大陆寒温带 1982~2006 年植被覆盖变化进行了研究,结果表明,欧亚大陆 NDVI 变化有明显的阶段性,1982~1997 年 NDVI 显著增加 ($1.8 \times 10^{-3}/a$),1997~2006 年呈下降趋势 ($-1.3 \times 10^{-3}/a$),在整个研究时段增加显著 ($0.5 \times 10^{-3}/a$)。

随着我国遥感科学的发展,我国植被覆盖动态变化的研究也随之增多。Young 和 Wang (2001) 利用 Pathfinder NDVI 数据对 1982~1999 年中国不同植被覆盖动态变化进行了研究,发现森林植被覆盖呈退化趋势,而农田植被覆盖呈改善趋势。Fang 等 (2002) 和 Piao 等 (2003) 利用 GIMMS NDVI 数据对我国 1982~1999 年植被 NDVI 变化进行了分析,研究表明,在月和季节尺度,植被 NDVI 无论在全国尺度还是生物群落尺度都显著增加,其中春季 NDVI 增加趋势最大,夏季 NDVI 增加趋势较小。Piao 等 (2015) 利用 GIMMS 第 3 代 LAI 数据对中国 1982~2009 年植被变绿趋势进行了研究,结果表明自 20 世纪 80 年代开始,我国多数区域植被覆盖增加,其中,西南地区及北部平原地区增加趋势明显。

孙睿等 (2001) 和杨胜天等 (2002) 利用 Pathfinder NDVI 数据研究了 1982~1999 年黄河流域的植被覆盖变化,发现该区植被覆盖处于上升趋势,青藏高原部分地区植被覆盖有所退化。马明国等 (2003) 使用 Pathfinder NDVI 数据对我国西北地区植被覆盖动态变化进行了研究,其结果与上述结果有所不同,他们得出 1981~2001 年西北多数地区 NDVI 呈下降趋势,新疆西北部和北部区域 NDVI 呈上升趋势。Tao 等 (2015) 利用 GIMMS NDVI 3g 数据对我国青藏高原地区草地植被覆盖变化进行了研究,得出草地植被 NDVI 在 1982~2000 年显著增加,2000~2006 年有所下降,2006 年以后变化平稳。Sun 等 (2015) 利用 SPOT VGT NDVI 数据对中国北部 1998~2011 年植被覆盖变化状况进行了研究,得出中国北方地区植被 NDVI 总体呈增加趋势。Tian 等 (2015) 利用 MODIS NDVI 数据对 2000~2012 年内蒙古地区植被覆盖进行了研究,发现内蒙古多数区域植被覆盖得到改善,其中西南部改善显著,东北少数区域植被覆盖退化显著。

黄土高原地处我国半湿润区到干旱区的过渡带,土壤多为黄土,生态环境脆弱,风力和水力侵蚀导致水土流失严重。因此,植被对改善黄土高原生态环境及减少水土流失有着重要作用。自 20 世纪 50 年代开始到 90 年代末期,由于人口

增加,陡坡耕地、植被砍伐及过度放牧等人类活动频繁,黄土高原植被覆盖退化严重,水土流失进一步加剧。国家自1999年开始,投入大量人力和财力在黄土高原实施退耕还林还草工程,这一政策使黄土高原植被覆盖得到一定改善,从而使生态环境向好的方向发展。因此,研究黄土高原植被覆盖变化对该区的生态环境建设和管理有着重要意义。使用遥感手段对黄土高原植被覆盖研究起步较晚,但随着遥感数据获得的简便性,近年来,许多学者对黄土高原植被覆盖进行了研究。

Runnström (2000) 利用 NDVI 数据对毛乌素沙漠 1982 ~ 1993 年植被覆盖进行了研究,得出该地区植被覆盖有所增加。Xin 等 (2008) 利用 GIMMS NDVI 和 SPOT VGT NDVI 数据对黄土高原 1981 ~ 2006 年植被覆盖变化进行了研究,结果表明,黄土高原植被覆盖经历了 1998 ~ 1989 年和 2002 ~ 2006 年的迅速上升、1990 ~ 1998 年稳定变化及 1999 ~ 2001 年迅速下降共 4 个阶段。植被覆盖变化空间分布差异较大,退耕还林还草地区植被 NDVI 增加显著,而丘陵沟壑区及山地森林区植被 NDVI 下降明显。徐丽萍 (2008) 采用 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 数据对黄土高原 1982 ~ 2005 年植被覆盖变化进行了研究,结果表明,黄土高原植被 NDVI 总体呈上升趋势,春季 NDVI 上升显著,夏季和秋季 NDVI 无明显变化;2000 ~ 2005 年退耕还林还草工程实施初期,区域植被 NDVI 增加显著。张宝庆等 (2011) 和张建香 (2013) 利用 GIMMS NDVI 和 MODIS NDVI 对黄土高原 1982 ~ 2011 年植被覆盖进行了研究,结果表明,黄土高原自 1998 年以来植被 NDVI 增加显著,主要增加区域为山西中北部、甘肃中部和东南部。卢柳叶 (2012)、张翀和任志远 (2011)、郭敏杰 (2014) 和张倩 (2014) 等利用 GIMMS NDVI 数据对 1982 ~ 2006 年黄土高原植被覆盖进行了研究,得出黄土高原植被覆盖虽然呈增加趋势,但增加不显著。Xie 等 (2015) 利用 LTDR NDVI 数据对黄土高原 1982 ~ 2011 年植被覆盖进行了研究,得出黄土高原植被覆盖在区域尺度上增加显著,不同气候区 NDVI 增加趋势有所不同,半干旱区和半湿润区植被覆盖增加显著,干旱区植被覆盖则在 1982 ~ 1994 年改善显著,1994 年以后呈退化趋势。

夏露等 (2008) 利用 SPOT VGT 数据对黄土高原 1998 ~ 2005 年植被 NDVI 变化进行研究,结果表明,2001 年之前 NDVI 呈减少趋势,2001 ~ 2003 年植被 NDVI 增加明显,2004 年以后 NDVI 增加趋势有所回落。Wang 等 (2010) 利用 MODIS NDVI 数据,采用主成分分析法对黄土高原 2001 ~ 2005 年泾河流域植被覆盖进行了研究,结果表明,第 1 和第 2 主成分解释了 89% 的植被 NDVI 变化,在第 1 主成分中,植被 NDVI 变化趋势自西北向东南增加,空间变化和降水变化相似。张树誉等 (2007)、刘咏梅等 (2011)、罗隆诚 (2012)、张翀等 (2012) 和

何远梅 (2015) 等分别利用 MODIS 和 SPOT VGT 数据对黄土高原自退耕还林还草工程实施以来的植被覆盖变化进行了研究, 得出黄土高原植被覆盖在干旱荒漠区有所退化, 在半干旱和半湿润过渡区变化较为复杂, 增加和减少相互交错, 在陕北和甘肃东部等地植被覆盖改善明显。

1.2.2 黄土高原植被覆盖驱动力研究

在陆地生态系统中, 植被覆盖变化受到多方面因素的影响, 目前对这些因素如何驱动植被变化的认识还较为有限。一般将这些影响因素分为两类, 一类是地形、气候、CO₂ 浓度及氮、磷沉降等这些自然因素, 另一类是植树造林、农业现代化、人口增加、经济发展、城市化及过度开垦和放牧等人类活动因素。气候变暖可能会改变植被物候 (开花期和落叶期等) (Jeong et al., 2011) 及生态系统初级生产力, 从而影响生态系统服务 (Feng et al., 2013)。全球变暖可能会增加春季和秋季植被生长期, 使得植被生长季延长, 植被覆盖度增加。自然因素在一定程度上对植被覆盖变化起主要驱动作用, 但人类活动也会对植被覆盖变化产生决定性影响 (朴世龙, 2004)。例如, 植树造林可直接使地区植被生长显著改善, 而快速城市化则会使地区植被覆盖迅速下降。

IPCC 第五次气候变化报告 (IPCC, 2013) 指出, 自 20 世纪 50 年代以来, 全球几乎所有地区升温过程都很明显, 1995 ~ 2009 年平均气温以每年 0.013℃ 的趋势上升。随着全球变暖, 全球极端气候加剧, 地表和海洋温度升高、海平面上升及冰川缩小。大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体浓度为 800 ka 来最高。温室气体增加, 使海洋吸收过多的 CO₂, 海水酸化, 海洋中动植物生存环境受到威胁。全球降水量与气温变化有所不同, 降水在湿润区不断增加而在干旱区不断减少; 雨季降水增加, 旱季减少, 极端降水事件频繁。

自工业革命以来, 人类活动频繁。联合国 2014 年世界人口状况简要报告指出, 世界城市人口 1994 ~ 2014 年间增加了 16 亿, 而农村人口无明显变化 (联合国, 2014)。城市人口增长使城市地区资源进一步开发和破坏, 周围植被覆盖进一步减少。植树造林则会对区域植被覆盖产生好的影响, 目前, 世界上造林的国家主要有美国、中国及欧洲一些国家 (李世东, 2002)。美国到 1990 年, 退耕还林还草面积达到 50 万 km²。截至 2000 年, 欧盟国家农业用地减少 11.0 万 km², 森林覆盖面积增加 16.5 万 km²。目前, 中国已有 14.7 万 km² 的耕地, 17.3 万 km² 的农业荒地因地制宜种植为人工草地和林地 (Feng et al., 2013)。

气候和人类活动的剧烈变化均会对植被覆盖产生影响, 目前对于北半球植被生长的驱动力意见不一。一些研究者认为全球变暖是导致北半球植被覆盖增加的

主要原因 (Kaufmann et al., 2002; Myneni et al., 1997; Nemani et al., 2003; Slayback et al., 2003; Zhou et al., 2001)。而在北半球干旱区, 全球变暖使蒸发增加, 土壤水分消耗较快, 从而抑制植被覆盖的增加 (Braswell et al., 1997)。Piao 等 (2014) 在对 1982 ~ 2011 年北半球植被和气温的关系研究中则发现, 北半球气温和植被覆盖的相关性呈下降趋势。一些研究者认为北半球植被覆盖增加的主要驱动力是大气中 CO_2 浓度增加, 导致对植物的施肥效应 (Ahlbeck, 2002; Barichivich et al., 2013)。一些研究者则认为在非洲、美国等地区及干旱区和半干旱区, 降水量对植被生长起着重要的作用 (Anyamba and Eastman, 1996; Mohammad et al., 2013; Wang et al., 2003; Yang et al., 1981)。一些研究者认为植被生长与气温和降水之间的关系随着时间的推移有所改变, Wang 等 (2003) 对美国大草原地区植被覆盖与气温和降水之间关系的研究结果表明, 在植被生长季开始期和结束期, NDVI 与气温正相关, 而在植被生长季中期, NDVI 与气温负相关。

一些研究者则认为植被生长对气候变化存在一定的滞后性, 但由于研究尺度不同, 产生的结果有所差异。Braswell 等 (1997) 研究发现, NDVI 对气温有大约 2 年的滞后响应时间。Wang 等 (2003) 指出, 美国大草原地区生长季植被 NDVI 对降水有 15 个月的滞后响应时间, 而对降水事件有 2 ~ 4 周的响应时间。Piao 等 (2006a) 指出, 中国植被 NDVI 对气温的滞后响应时间为 3 个月。Chuai 等 (2013) 指出, 内蒙古植被 NDVI 对降水有 2 ~ 3 个月的滞后响应时间。而 Farrar 等 (1994) 则指出, 南非博茨瓦纳半干旱地区植被覆盖与降水量的滞后响应时间随土壤类型的变化而不同。

也有研究指出, 植被生长对地形、日照、地表温度及极端气候等自然因素较为敏感。Raynolds 等 (2008) 研究表明, 北极地区植被覆盖与地表温度正相关, 夏季温暖指数 (summer warmth index, SWI) 每增加 5°C , NDVI 增加约 0.07。Ackerly 等 (2015) 通过对圣弗朗西斯科港湾区 22 种主要植被类型在 54 种气候情境下进行建模研究发现, 靠近海岸线、日照时长较少、北坡及降水量较多地区的植被对气候变化高度敏感。Pang 等 (2015) 指出, 干旱、半干旱生态系统 NDVI 受降水、土壤和植被类型影响较大, 也会受到温度、日照时数和海拔的影响。海拔会增加土壤类型对植被 NDVI 的影响程度, 而日照时数和海拔会增加温度对植被 NDVI 的影响程度。Mennis (2001) 指出, 美国东南部植被覆盖变化与厄尔尼诺暖周期存在着持续的负相关关系。Cuomo 等 (2001) 指出, 意大利南部针叶林植被覆盖退化与森林火灾和人类活动关系较密切。

在我国, 也有许多研究者对植被覆盖的驱动力进行了研究。陈云浩等 (2001) 对我国 1983 ~ 1992 年植被覆盖变化的气候驱动因子进行了研究, 并将我