

密级：

论文编号：

中国农业科学院 学位论文

内蒙古草原产草量遥感监测方法研究

**Remote Sensing Methods for Monitoring Grassland Production
in Inner Mongolia**

硕士研究生：陶伟国

指导教师：徐 斌 研究员

申请学位类别：理学硕士

专 业：生态学

研 究 方 向：草地遥感

培 养 单 位：中国农业科学院研究生院

农业资源与农业区划研究所

提交日期 2007 年 6 月

Secrecy:

No.

Chinese Academy of Agricultural Sciences
Master Dissertation

**Remote Sensing Methods for Monitoring Grassland Production
in Inner Mongolia**

Ms. Candidate: Tao Weiguo

Advisor: Prof. XuBin

Major: Ecology

Specialty: The Application of Remote Sensing in
Grassland

Chinese Academy of Agricultural Sciences

June 2007

中 国 农 业 科 学 院
硕士学位论文评阅人、答辩委员会名单表

论文题目		内蒙古草原产草量遥感监测方法研究				
论文作者		陶伟国	专 业	生态学	研究方向	草地遥感
指导教师		徐斌		培养单位（研究所）		资源区划研究所
姓名		职称	硕（博） 导师	单 位	专 业	签 名
评 阅 人	覃志豪	研究员	硕导□ 博导■	中国农业科学院	农业遥感	
	李召良	研究员	硕导□ 博导■	中国科学院地理所	定量遥感	
答 辩 主 席	陈佑启	研究员	硕导□ 博导■	中国农业科学院	环境工程	
答 辩 委 员	章力建	研究员	硕导□ 博导■	中国农业科学院	农业生态	
	李召良	研究员	硕导□ 博导■	中国科学院地理所	定量遥感	
	刘连友	研究员	硕导□ 博导■	北京师范大学	资源生态	
	董云社	研究员	硕导□ 博导■	中国科学院地理所	地球化学	
	王道龙	研究员	硕导□ 博导■	中国农业科学院	资源环境	
	任天志	研究员	硕导□ 博导■	中国农业科学院	农业生态	
会议记录（秘书）			杨秀春			
论文答辩时间地点			2007.06.16 在区划所 2 楼			

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：

时间： 年 月 日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

论文作者签名：

时间： 年 月 日

导师签名：

时间： 年 月 日

摘 要

内蒙古草原是中国北方的天然生态屏障，全国五大牧区之一，也是中国重要的畜牧业基地。能够准确及时的获取该区域牧草的产量以及随时间、空间变化的特征是实现合理、高效、持续利用草原资源的关键，因此利用卫星遥感技术对内蒙古草地进行动态监测和估产研究具有重要意义。其次，内蒙古草原类型典型，地面样方丰富，以内蒙古草原为平台进行产草量的遥感估算方法研究对其他地区同类研究也具有借鉴意义。

目前草原产草量动态监测中使用较为广泛的是统计模型，但不同的研究者由于使用地面样点数量不同做出的结果差异较大，不少情况下缺少模型验证，主要是选择几种遥感指标通过决定系数做简单的比较，结果的可靠性难以保证。因此，本文以内蒙古 2006 年采集的地面数据为平台，通过多种方法、多种遥感指标的对比分析，建立适用于内蒙古草原产草量动态监测模型，为内蒙古草原管理提供依据。

本研究以 TERRA/MODIS 反射率产品、AQUA/MODIS 反射率产品和内蒙古 2006 年大量的地面实测数据为基础，分卫星建立了单波段、多波段、和植被指数模型，以及双星协同多波段模型，其中植被指数包括已有的 9 种植被指数和 12 种新构造的包含短波红外波段的植被指数，共得到 450 个拟和方程。通过统计判断，敏感性分析和模型验证，提出了动态分区的方法，既是在高植被覆盖区也保证遥感指标对产草量的变化有显著的敏感性。分区的定量化标准由敏感性分析结合模型验证确定，最终建立了包含两种植被指数的较高精度的估算模型，保证给予每一子区可靠的估算结果，克服了以往通过统计量大小选取最优模型的不足。在产量低于 1800 kg/hm^2 区域， $\text{RRMSE}=0.25$ ， $\text{RMSE}=264.7 \text{ kg/hm}^2$ ；在产量高于 1800 kg/hm^2 的区域， $\text{RRMSE}=0.22$ ， $\text{RMSE}=684.5 \text{ kg/hm}^2$ 。本模型涵盖了四个波段，计算量小，容易实现，且精度可以满足大范围草原产草量动态监测。

最后，通过实际应用计算出了 2006 年 7 月底至 8 月初内蒙古草原产草量情况。

关键词： 内蒙古，产草量，植被指数，TERRA/MODIS，AQUA/MODIS

Abstract

As one of the country's five major pastoral regions, grassland in Inner Mongolia is a natural ecological barrier for Northern China, and is also China's important base for stockbreeding. To be accurately and timely get forage production over different time and space in this region is the key to achieve a reasonable, efficient, sustainable use of grassland resources. Therefore the use of remote sensing technology for Inner Mongolia grassland dynamic monitoring is of great significance. Secondly, the types of grassland in Inner Mongolia are typical, and plenty of samples were gathered. The remote sensing research of grass output based on grassland in Inner Mongolia is very useful to other similar studies.

Currently, statistical models are more widely used in dynamic monitoring of grassland production. But different researchers get different results with different numbers of ground samples, and validation is also not performed in many cases. Only several remote sensing indicators are compared with the determination coefficient. The reliability of the results is difficult to guarantee. Therefore, it is necessary that production dynamic monitoring model is established in Inner Mongolia to provide a basis for management, through comparisons of a variety of remote sensing indicators and methods on the same dataset obtained in 2006.

This paper based on TERRA/MODIS data, AQUA/MODIS data and a lot of ground data collected from the Inner Mongolia Autonomous Region in 2006, single-band, multi-band, vegetation index model and Multi-band model of TERRA/AQUA binaries are established. Vegetation indices include the nine vegetation indices already widely used and the twelve new vegetation indices including shortwave infrared band. A total of 450 regression equations are obtained. Through statistical judgment, sensitivity analysis and model validation, a dynamic partitioning approach is proposed which hold an advantage that in the areas with high vegetation cover, models also guarantee that vegetation index is notably sensitive to the change of production. By the combination of sensitivity analysis and the field validation, the quantitative standards of dynamic partitioning are determined. Finally the optimal model including two VIs is established, which guarantees accurate estimation to every partitioning, and overcomes the disadvantage of selecting the optimal model only through determination coefficient in the past. When production is lower than 1800 kg/hm^2 , RRMSE equals to 0.25 and RRMSE equals to 264.7 kg/hm^2 . When production is higher than 1800 kg/hm^2 , RRMSE equals to 0.22 and RRMSE equals to 684.5 kg/hm^2 . This model covers four bands and has a small amount of calculation, thus it can easily come true and has enough precision to meet real-time monitoring grassland production on a large scale.

At last through the application, total grassland production in Inner Mongolia is calculated by the end of July to the beginning of August 2006.

Key word: Inner Mongolia, Production, Vegetation Index, TERRA/MODI, AQUA/MODIS

目 录

第一章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 及时掌握草原产草量是草原管理的迫切需要	1
1.1.2 遥感技术的发展为开展草原资源动态监测和管理提供了有力工具	2
1.1.3 小结	2
1.2 研究进展	2
1.2.1 遥感估算方法综述	2
1.2.2 产草量遥感估算的影响因素	4
1.3 研究的目的是和意义	7
1.4 技术路线与研究方法	8
1.5 研究区概况	12
第二章 数据的获取与处理	13
2.1 地面数据的获取与处理	13
2.2 遥感数据的获取与处理	13
2.2.1 MODIS反射率产品	14
2.2.2 反射率产品质量检查	15
2.2.3 植被指数计算	16
2.2.4 植被指数的提取	19
第三章 估算模型的建立	21
3.1 单波段模型	21
3.1.1 相关分析	21
3.1.2 建立模型	22
3.1.3 小结	24
3.2 多波段模型	24
3.2.1 建立模型	24
3.2.2 小结	26
3.3 植被指数模型I	26
3.3.1 相关分析	27
3.3.2 建立模型	29
3.3.3 小结	31
3.4 植被指数模型II	31
3.4.1 相关分析	31
3.4.2 建立模型	34
3.4.3 小结	36
第四章 模型评价	37
4.1 统计评价	37

4.2 敏感性分析	38
4.2.1 敏感性函数的数学推导	39
4.2.2 敏感性分析	40
4.3 模型验证	42
4.4 小结	43
第五章 模型应用	45
第六章 结论与展望	48
参考文献	50
致谢	55
作者简介	56

英文缩略表

英文缩写	英文全称	中文名称
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	归一化植被指数
EVI	Enhanced Vegetation Index	增强型植被指数
TGDVI	Three-band Gradient Difference Vegetation Index	三波段梯度植被指数
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	修改型土壤调整植被指数
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	绿色归一化植被指数
DVI	Difference Vegetation Index	差值植被指数
RVI	Ratio Vegetation Index	比值植被指数
RDVI	Re-normalized Difference Vegetation Index	重归一植被指数
OSAVI	Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	优化土壤调节植被指数
VI	Vegetation Index	植被指数
RRMSE	Relative Root Mean Squared Error	相对均方根误差
RMSE	Root Mean Squared Error	绝对均方根误差

第一章 引言

1.1 研究背景

1.1.1 及时掌握草原产草量是草原管理的迫切需要

内蒙古拥有天然草原 8800 万公顷，占全国草原总面积的 22%，占自治区国土面积的 74.4%，是自治区耕地的 12.4 倍，森林的 4.2 倍。内蒙古草原是欧亚大陆草原的重要组成部分，也是目前世界上草原类型最多，保存最完整的草原之一，代表着欧亚大陆草原众多草原类型的典型特征和天然草原生态系统的自然特性。内蒙古草原也是中国北方的天然生态屏障，全国五大牧区之一，中国重要的畜牧业基地。畜牧业在这里有着独特的优势，是自治区的国民经济的重要基础产业。

新中国成立初期，内蒙古草地利用强度较低，牧区草原承载能力高于实际载畜量。到六十年代中、后期随着人口的增长，载畜量已达到或超过了天然可利用草原的负荷能力，1965 年内蒙古平均每只羊单位仅占草场 0.97 公顷，不足 1947 年的 24%，草畜矛盾开始显现。20 世纪 80 年代，牧区开始实行的牲畜承包责任制，调动了农牧民养畜的积极性，但由于人口的快速增长，对草原利用缺乏科学认识、致使牲畜数量再次进入快速增长期，超载现象十分严重，根据徐斌等（2005）对我国北方草原生产力和载畜平衡的研究，2005 年内蒙古牧区超载以上的草地面积占天然草地总面积的 44%（Bin Xu et al,2005）；在 2006 年，内蒙古 54 个牧区半牧区旗县中，有 30 个处与超载及严重超载。由于不合理的利用，全区草原退化面积急速增加。据本世纪初调查显示：草原退化面积已占草原总面积的 73.5%。草原生态环境的恶化导致沙尘暴不断发生，风蚀、水蚀作用加强，造成大面积水土流失与土地沙化。

在目前草地生态恶化，超载严重的情况下，为了保护生态脆弱带的草原生态系统平衡，遏制草原退化的趋势、以及保证畜牧业经济的可持续发展，必须寻求草原资源合理利用和草原保护建设的途径和措施，必须及时、准确地掌握草原资源的动态变化情况，这就要求进行草地生产和植被状况的快速精确监测，其中对草原生产力监测是草原监测和预警的主要研究内容之一，也是国内外研究较多、应用较多的一项内容。草原地上生物量是反映草原状况的最直接的指标，能够代表草原第一性生产力的基本水平，并且很大程度上决定了为草原第二性生产的供给总量，也是反映载畜能力的根本指标；地上生物量在很大程度上决定了草原的生态状况，对草原生态功能的强弱也有很大的决定作用。虽然并不是草原地上生物量决定草原的一切特性，但就确定的草原类型而言，地上生物量无疑是最重要的指标。

1.1.2 遥感技术的发展为开展草原资源动态监测和管理提供了有力工具

准确及时地获取牧草产量数据并掌握其随时间和空间的变化特征是草原资源动态监测的重要内容，是草原管理的重要依据。常规调查方法由于耗费人力、物力太大，所获得的资料在时间和空间上都过于离散，显然不能满足监测的需要。而遥感技术由于省时、省力、监测范围广、监测周期短等特点迅速在草地资源研究中得到了广泛的应用。我国自 80 年代开始，陆续开展了大面积草原遥感应用研究。到目前为止，遥感技术 (RS)、地理信息系统技术(GIS)和全球定位技术(GPS)与地面测点的结合已成为目前大尺度草产量动态监测的主要手段。随着空间技术的飞速发展，特别是美国国家航空航天局 (NASA) 对地观测系统计划的实施，TERRA 卫星发射成功标志着人类对地观测新的里程的开始，其上携带的中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 是新一代地球观测系统中“图谱合一”的光学传感器，通道多 (具有 36 个光谱通道)，谱带窄，有三种可选的空间分辨率 (250m, 500m 和 1000m)，每一天或两天可获得一次全球观测数据，而且数据全球免费，这些特点使得 MODIS 数据在大范围草地的动态监测中优于已有其它卫星数据，并且在时间、空间和精度上能够满足草原管理部门的需求。总之，遥感技术的发展为大范围草地资源动态监测和管理提供了强有力的手段。

1.1.3 小结

综上所述，一方面有草原管理部门和畜牧业生产部门的迫切需求，需要及时准确地掌握草原产量动态变化情况来辅助草原管理决策；另一方面，遥感技术经过 20 世纪后半叶的发展，无论在理论上、技术上和应用上均发生了重大变化，利用新一代传感器 (MODIS)，借鉴国内外已有的研究成果，在区域尺度上建立适用于内蒙古草原的高精度遥感估算模型是可以实现的，即技术上是可行的。在这样的背景下，本文的研究是必要的、可行的也是实用的。

1.2 研究进展

草原产草量的获取有地面样方估算、气候模型、遥感模型等方法。遥感模型大面积估产具有优越性，实践也已经证明，运用遥感技术可以满足不同草原生产力估产的精度要求，能在取得较高精度的基础上花费较少的人力和物力，同时保证其时效性、动态性、客观性和实用性。

1.2.1 遥感估算方法综述

遥感图像光谱信息具有良好的综合性和时效性，与植被生物量之间存在较好的相关性，基于遥感信息的草地生物量估测比传统方法在时空尺度上更加优越。用于区域植物生物量估测的遥感模型基础是从光合作用即植被生产力形成的生理过程出发，在建立模型的过程中，根据植物对太阳辐射的吸收、反射、透射及其辐射在植被冠层内及大气中的传输，结合植被生产力的生态影响因素，最后在卫星接收到的信息之间建立完整的数学模型及其解析式 (张佳华等, 1999)。

这些模型大致可以分为两大类，一类是统计模型，另一类是综合模型。统计模型相对容易实现，主要是对参数间的统计分析，参数的生态学原理不用探明，但应用方便；综合模型主要考虑了物理过程，参数一般具有一定的物理学意义，但实际应用受到一定的限制。

1.2.1.1 统计模型

统计模型或经验模型一般是描述性的，不涉及机理问题，主要是对观测数据与遥感信息进行统计描述或相关分析，建立适当的公式用于估算。因为反射率与生物量之间存在一定的关系，反射率与 LAI (叶面积指数) 之间关系密切，而 LAI 的大小又与生物量的关系密切，因此可利用单波段发射率或不同波段间反射率的组合来估算地面生物量。

目前基于统计的草原遥感估产有 3 种技术路线 (任继周主编, 1998): (1) 遥感影像像元绿度值 (植被指数 VI) — 地面生物量关系模式 (金丽芳等, 1989; 李京等, 1994; 陈全功等, 1994; 陈添宇等, 1999; Todd S.W. et al, 1993, 1998; 王正兴等, 2005; 朴世龙等, 2004; 牛志春等, 2003;), 本方法得到的遥感估产等级图只反映卫星摄影时的牧草的长势和生物量的空间分布状况, 如果遥感摄影时间与地面测产时间基本同期, 误差不大, 或至少草地牧草产量在空间上的分布趋势与遥感估产一致; (2) 遥感影像像元绿度值 — 地物光谱绿度值 — 地面生物量关系模式 (李建龙等, 1996; 黄敬峰等, 1999a, 1999b, 2001), 本方法先求得遥感光谱绿度与实测地物光谱绿度之间的关系, 再求遥感光谱绿度与草地生物量之间的关系, 缺点主要是地物光谱与遥感资料不易同步获取, 其次是天气干扰, 地面和天空都易受云层的影响; (3) 遥感 — 地学综合模式 (史培军等, 1994; 赵冰茹, 2004; 李建龙, 1995) 本方法将区域水热因子例如气温、降水、累计降水量、平均土壤含水量等引入模型, 与遥感 — 地面生物量模型互相补充, 克服各自存在的缺陷, 可进一步提高估产精度。已建立的统计模型有线性、幂函数、指数、对数、Growth、Logistics 等, 回归的方法也有一元回归、多元回归、逐步回归等, 得到的系数差别较大, 并且应用也局限于建模的时间和地点, 很多情况下地面资料的数量也影响了模型的精度 (见附表 1)。

尽管大部分模型还存在一些问题, 例如建模的地面数据少、影像空间分辨率低、放牧处理对建模的影响还不确定 (Todd S.W. et al, 1993)、植被指数的饱和性问题、干旱和半干旱地区的牧草与其下垫面形成的混合光谱问题、以及由于空间的异质性导致的估算精度的不稳定性 and 过程过度的简化等问题, 但遥感统计模型覆盖范围广和允许详细的光谱分析 (Pickup G, et al. 1993), 以及快速、精度可满足实际应用的优势, 也使得本方法具有广阔的应用前景。

1.2.1.2 综合模型

综合模型借助遥感信息和植被信息、气象因子等来建立, 由于包含了更多的信息量, 考虑了辐射传输的 3D 模型、几何光学的间隙率模型等, 可以更加精确地反映植被的生物物理参数。其中遥感数据在模式中的应用有 4 种模式 (赵艳霞等, 2005): (1) 直接将遥感反演值用到模型中驱动模型; (2) 用遥感“观测值” (如叶面积指数 (LAI) 更新模型中相应的变量; (3) 通过调整初始条件使得模拟值与遥感“观测值”一致, 进而确定模型的初始值; (4) 通过调整模型参数使得模拟值与遥感“观测值”一致, 进而确定模型的参数值。

Cayrol P. et al. (2000) 通过土壤—植被—大气传输模型与植被的生长模型相结合利用 1997 年至 1999 年在墨西哥的 SALSA 项目中收集的数据研究了草地动态、水分和能量预算的交互作用, 研究表明 3 年来, 植被生物量和叶面积的变化能够被模型很好的反演, 这在区域尺度上使用新一代卫星数据来调节和验证模型的模拟结果迈出了很重要的一步 (Cayrol P. et al, 2000); Bella C.DI. et al. (2004) 利用遥感数据对产量模拟模型——STICS-Prairie 模型的部分输入参数进行校正或更新, STICS-Prairie 模型的性能得到改进, 这使模型可以独立于插值、统计和气象数据而获得准确、客观的生产信息 (Bella C.DI. et al, 2004)。Benie G.B. et al. (2005) 对 Wu (1996) 提出的半干旱地区放牧系统模拟模型进行改进, 将社会经济信息以及遥感资源与之整合来降低对数据的获取费用, 并同时考虑了放牧强度的影响, 修改后的模型对近 20 年的生物量的模拟精度至少在 80% 以上, 更为复杂的生态物理模型 STEP (Sahelian transpiration evaporation, and productivity) 模型的模拟结果与实测结果的相关性可以高达 0.95 (Benie G.B. et al, 2005)。Prince S.D. et al. (1995) 提出了基于光能利用率的全遥感模型 GLO-PEM, GLO-PEM 的参数可通过遥感手段获得, 其应用取决于所获取数据的质量, 因此全球 NPP 或生物量的估算精度仍较低 (Prince S.D. & Goward S.N., 1995)。

尽管这类方法前景广阔, 但受到模型中大量的参数和变量获取的限制 (例如呼吸、衰老、光合作用、碳分配、凋落物的分解等), 以及当物种的组成在时空上变化较大时复杂的、异质性的冠层的描述问题的影响, 部分模型只适用于当时的研究区域, 如何通过“尺度扩大”(Up scaling) 来改进模式中的区域限制, 更好的适应遥感信息的同化需要, 也是急需解决的一个关键问题。

1.2.2 产草量遥感估算的影响因素

1.2.2.1 植被指数

早在 1979 年 Tucker 研究发现了 NDVI 对光合有效生物量的变化比较敏感之后 (Tucker C.J., 1979), 植被指数就被用来研究大范围植被类型的生物量和季节性产量。植被指数并不是对生物量或初级生产力的直接测量, 但它与叶面积指数和生物量有很好的相关关系, 因此被用来估计这些参数。研究中使用到的植被指数多达十几种, 主要分三大类, 基于波段简单线性组合的植被指数、消除影响因子的植被指数和针对高光谱遥感和热红外遥感的植被指数。新提出的抗干扰型植被指数与产草量的关系是否一定优于 NDVI 或 RVI 还不确定。Davidson 和 Csillag (2001) 发现, 选用更复杂的植被指数例如 SAVI 和 MSAVI2 并不能提高生物量的估算精度 (Davidson A. and Csillag F., 2001)。Bork et al (1999) 的研究发现 SAVI 在估算植被活体的生物量时与 NDVI 的结果相比精度没有提高或提高很小 (Bork E.W. et al, 1999)。Rick L.L. 和 William J.R. (1997) 比较了在受到高度干扰和空间异质性大的景观中多种植被指数与植被盖度的关系, 发现基于原始数据的红波段和近红外波段的经过土壤背景调整的植被指数只能解释植被盖度变化的 55%—65%, 而两个未经过校正的植被指数能分别解释盖度变化的 70% (Rick L.L. & William J.R., 1997)。而 Kawamura K. et al (2005) 对我国锡林郭勒草原的研究中发现 MODIS/EVI 在估算产草量时优于 AVHRR/NDVI, AVHRR/NDVI 只能解释活体生物量的 62%, 而 EVI 可以解释 80% (Kawamura K. et al, 2005)。目前在文献中关于这些植被指数在不同环境下的性能还存在争论, 但是我们应该清楚大多数植被指

数在功能上都是一样的，都遵循植被指数与光合作用之间的关系(Myneni R.B. et al,1995)。

1.2.2.2 地面数据

地面数据的获取主要是利用野外测量法得到。但是应该注意到野外的采样方法会影响到遥感指数与生物量的关系 (Todd S.W. et al,1993)。放牧的强度会改变地面上现存量、立枯物量和凋落物量的比例以及植被群落的覆盖特性，在不放牧的情况下，有数量可观的绿色植物和干枯的植株存在，由于这些干枯或死亡的植被与土壤背景之间光谱混合的影响，用遥感技术估算地面活体生物量存在很大困难。当有灌丛存在时，由于它们的冠部不对称会产生不同的反射特征以及非当年植物部分对灌丛反射光谱的贡献，简单套用非灌丛化草原的估产模式，很可能会低估其产量，为了克服这种误差，Chehbouni(1994)等提出了多向植被指数，通过引入一个阴影参数对 MSAVI 进行了修正，修正后的模型在所有观察方向及太阳高度角下都能产生相同的反射率 (Chehbouni A. et al,1994)。

地面测量数据的数量对生物量的估算也有很大影响。首先样方面积通常 $\leq 1\text{m}^2$ ，而卫星数据的像元通常 $>400\text{m}^2$ ，由于两者之间尺度的不同，在生物量估算中就会引入采样误差。其次，并不能保证采集的野外数据都能获得较好质量的遥感信息与之匹配。如果要描述一块牧场的特征，大概需要 60~300 个样点 (Curran P.J.& Williamson H.D.,1987)，这就意味着，为了反映遥感数据和地面数据的关系大量的、高质量的样点是必须的 (Friedl M.A. et al,1994)。在澳大利亚西部，Hill M.J.et al(1998)为了估算生物量，在一年生草场沿横断面就单个特征采集了大概 1000 个样点 (Hill M.J.et al,1998)。徐斌等 (2007) 利用近 3000 个样方对中国 2005 年草原产草量进行了系统估算 (徐斌等, 2007)。多大的区域需要多少样点并没有确切的规定，研究的目的不同也使得很难给出一个参考值，但是尽可能多的样点总是有利的。

1.2.2.3 不同尺度信息源的匹配

地面测量数据、不同遥感测量方式获取的数据和应用需要的其它数据在尺度上是不一致的，需要进行匹配转换。目前在估产中用到的尺度转换还是基于像元的数理统计回归分析方法，通过在不同尺度的数据之间建立函数关系来完成由局部的点到整个面的转换 (彭晓鹃等, 2004)。

最常使用的方法即样点法，即地面采样点与单个像元或其周围几个像元的植被指数的平均值相对应，也有人使用了“面对面”的方法或绿度分层法 (Anderson G.L.et al,1993; 陈全功等, 1994)，建立平均植被指数与草地产量级之间的关系来构成绿度与绿色生物量的高度相关。由于像元空间分辨率的限制，每个像元的值反映的是像元内几种不同土地覆盖类型对光谱的综合响应，因此利用混合像元分解技术来获取每种像元组分的光谱响应，使得纯草地光谱信号与地面草地信息精确匹配 (Andrew J.E. et al,2000)。但我们必须清楚混合像元内的各组分并非简单的线性关系，而且在植被稀疏，土壤反射率高的情况下，植被指数与植被覆盖率之间的关系不是固定的，它随地点而变 (Lobo A. et al,1998)。还可以通过两步转换的方法即“地面—高分辨率影像或地面光谱—低分辨率影像”来实现两种尺度相差较大的信息源的关联。1992 年 Aman 等发现高空间分辨率上 NDVI 平均值与低空间分辨率上相应地点的 NDVI 值基本呈线性关系 (Aman A. et al,1992)。史培

军等（1996）的研究中通过利用地面光谱与气象卫星光谱的定量关系，进而使地面实测产量与低分辨率影像AVHRR数据相对应建立相关模型，同时也实现了简单而有效的大气校正(史培军等，1994)。这种方法也被用于MODIS的地面产品的验证中(<http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/VAL/>)。

1.2.2.4 时间的选择

金丽芳和刘太平（1989）用经过大气校正的TM数据计算得到的正交指标PVI对内蒙古达里诺尔地区草场的产草量进行遥感估算与监测，得出估测当年产草量时，要选择牧草生长旺季的资料（金丽芳等，1989）。陈添宇等（1991）对甘南州的研究发现植被指数与产量的相关系数越接近绿峰时越高（陈添宇等，1999）；龙瑞军等（1994）对高山草地的研究表明，在植物生长盛期，可用近红外波段反射率上的差异来区分高山草地生物群落的空间分布（龙瑞军，1994）。王正兴等（2005）利用增强型植被指数反演锡林郭勒盟的草地上生物量时，也得出地面采样时间对模型影响较大，7月份模型相关性较高（王正兴等，2005）。因此建立模型时要注意数据之间时间上的配合，最好是产草量最高时或者是在植被的生长旺季，但这也使得建立的模型缺乏在时间上的普适性。刘钟龄对内蒙古羊草+大针茅草原植被生产力的研究表明，1981-1986年，年度的高峰生物量出现时间是不相同的，综观六年的变幅，大约在90天到115天之间（刘钟龄和李忠厚，1987）。因此这也给地面采样工作带来一定的困难，通常采样时间主要在7月底至8月初。

1.2.2.5 景观生态分区

根据景观生态条件、草类状况、管理方式等将工作区划分为若干个子区，每一子区内环境条件、草类、管理方式基本相同，使其内部覆盖度与产量的关系基本上是单值对立的，每一子区构成了一个估产单元，其内部遥感估产的假设可以成立，对每一单元分别建立估产模型就能解决“同谱异质”或“同质异谱”的问题（李京等，1994）。王艳荣等（1996）在戈壁针茅荒漠草原产草量与植被指数相关性的时空动态研究中发现，荒漠草原植被指数与产草量的相关性受群落类型、植被指数类型及测定月份的影响，分区建模是必要的（王艳荣和雍伟义，1996）。刘国华等（2003）对岷江干旱河谷三种主要灌丛地上生物量的分布规律进行研究后发现，荻灌丛的地上生物量随海拔的上升而减少，而小花滇紫草灌丛和川甘亚菊灌丛的地上生物量则随海拔梯度的升高而增加，但三者都呈现出较好的相关性（刘国华等，2003）。Guo等（2000）的研究表明把草地按6种管理方式进行分类后建立草地生物量与植被指数的关系，决定系数提高了0.11（Guo X. et al,2003）。Xu Bin et al（2006）将中国划为6个区域分别建立模型对产草量进行估算，地面验证结果显示分区模型的精度高于将全国作为一个区域建立的模型的精度（Xu Bin. et al,2006）。杨秀春等（2007）将北方农牧交错带划分为四个区对草原产草量进行估算，得出分区模型较不分区模型决定系数总体上有所提高（杨秀春等，2007）。陶伟国等（2007）考虑了内蒙古草原目前的利用状况，并将利用状况作为虚拟变量引入估算模型，估算精度达到了79%（陶伟国等，2007）。一般来讲，光谱指数与生物量之间的相关性会随着草地类型细分和空间异质性的递减而增强。

1.2.2.6 环境条件

在空间尺度上,降水被认为是影响生物量变化的主要因素。但是,在时间尺度上,有关植物群落生物量的年际变化与降水变化相关性的研究却存在不同结论(蔡学彩等,2005)。半干旱地区草原植物群落牧草生产量和降水量的相互关系可以广泛地用来解释植物生产的变异性,由于水分可利用性和植物生产量之间的相互关系,因此降水量可作为预测植物生产量的可靠指标(Noy M.I.,1973)。韩国栋(2002)对小针茅荒漠草原植物群落地上初级生产力多年动态规律及其与降水量和气温波动的关系进行长达37年(1958~1994)的研究表明,小针茅草原年净生产量的变异与4~8月累积降水量的变化相接近,且两者的变化几乎是同步的,说明4~8月的累积降水量决定了植物群落的年净生产量(韩国栋,2002)。牛建明(2001)研究了森林草原、典型草原和荒漠草原对两种气候变化方案的响应,结果表明:草原对温度的升高以及人为干扰均更为敏感(牛建明,2001)蔡学彩等(2005)对大针茅草原17a的气象资料以及生物量资料进行研究,大针茅草原地上生物量与年度降水、月降水和关键时期降水之间的相关分析结果表明,年度降水变化、月降水和关键时期降水的变化与群落生物量之间没有显著的相关性(蔡学彩等,2005)。土壤水分状况对生物量的关系,一般认为土壤湿度保持在田间持水量的50-60%,植物生长良好而产量较高(北京农业大学主编,1992)。大量的研究表明:在空间尺度上引入气候与环境变量后(均温、积温、日照时数、降水量、土壤湿度、太阳辐射等)统计关系更为密切,估产效果要好于植被指数—地面生物量模型,对环境变量的选择依赖于草地类型、生长阶段和所处的生态环境(黄富祥等,2001; Paruelo J.M.&Lauenroth W.K.,1998)。

1.3 研究的目的是和意义

建立统计估算模型是本文研究的重点。通过对国内外文献的分析整理,可以发现目前已建立的统计估算模型在应用中存在以下问题:

- a) 不同研究者只是选择几种遥感指标通过决定系数做简单的比较,缺乏验证,结果的可靠性难以保证,即使验证,由于使用的表征精度的统计指标不同,所得精度难以比较。
- b) 地面样点数量不足。建立统计模型,足够的样本量是模型参数估计准确的保证。样本量过少,二维散点分布不足已表达潜在的趋势,很可能得出错误的结论;其次部分样点并不一定能获的相匹配的质量好的遥感信息。但从花费的人力、物力和时间考虑,很多研究没有足够的地面数据支持。
- c) 已有的研究中也考虑了将研究区域分为不同的子区单独建立模型,以提高模型的估算精度,分区的依据均为定性标准,从遥感指标敏感性和模型估算精度的角度给出分区的定量指标研究较少。并且一些分区的方法在实际应用中难以实现。
- d) 很多研究中仅通过决定系数(R^2)的大小来判断模型的好坏。事实上,单个最适模型在整个区域并不都表现良好,尽管得到了合理的 R^2 ,但只是对模型作出的综合评价,不代表空间上都有这样的表现,缺乏对模型在空间上的具体表现的评价。

因此,本文的研究目的是,利用TERRA和AQUA两种过境时间不同卫星上的MODIS数据构建不

同的遥感指标，在同一地面数据平台上建立估算模型，并对模型从多个方面进行详细的对比分析，讨论适宜草原产草量动态监测的卫星数据和遥感指标，最终确定适合于内蒙古区域的遥感估算方法，并结合敏感性分析给出模型在空间上的精度分布情况。最适模型中包含的遥感指标反映产草量变化的动态范围宽，无饱和现象，即对产草量的变化反应灵敏；针对面积大，适时形的估产监测工作，指标与产量的关系简明，便于运算。

通过解决上述问题，本文的研究内容在理论上和实践上都具有了重要意义：

理论上：从单波段、多波段以及波段间的线性和非线性组合探讨了利用 MODIS 数据估算区域尺度的草原产量的可行性；从方法上提高了草地产量遥感监测的精度，为更大尺度的草地产量遥感监测方法的研究积累了经验，丰富了草地资源动态遥感监测理论，为其它相关研究例如陆地生态系统的碳循环研究等提供了科学依据；同时对 TERR 和 AQUA 两种卫星数据产品的对比评价，对 MODIS 反射率产品的选用也具有极大的参考意义。

实践上：草地产草量是草业生产力高低的重要衡量指标，同时也是制定畜牧业生产规划的基础。能否及时掌握准确地大面积草地动态产量资料，对计算草地载畜量和安排草畜生产，提高草地畜牧业生产力，实现草地资源的可持续利用，有效的发挥草地资源的经济效益，维持草地生态系统的平衡，都具有十分重要的意义。

1.4 技术路线与研究方法

本文研究的技术路线如图 1—1 所示：

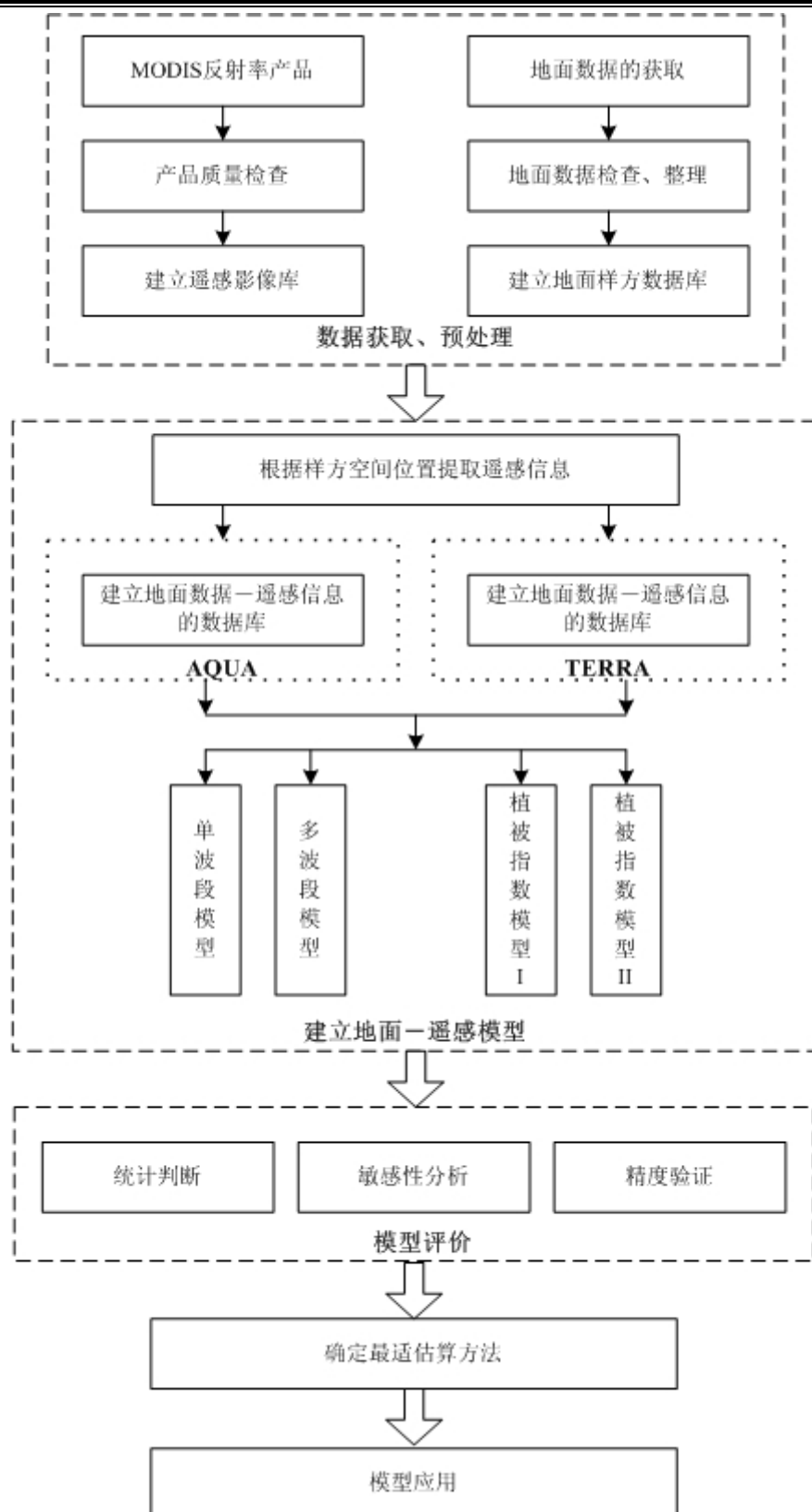


图 1-1 技术路线图

Fig1-1.Main technology route

本研究主要包括三部分内容，数据的获取与处理——建立模型——模型评价，其中统计分析是本文中使用的最多的方法，下面就主要使用的三种统计方法作一简要介绍：

(1) . 相关分析

相关分析是研究不同变量间密切程度的一种常用的统计方法，主要是描述两个变量之间线性关系的密切程度。常用的相关分析方法有 Pearson 相关，即极差相关，是最常用的相关分析，计算连续变量或等间距测度的变量间的相关分析；Spearman 相关，即等级相关，利用两变量的秩次大小作线性相关分析；Kendall 相关，即等级相关，计算分类变量间的秩相关。Pearson 相关分析要求资料服从双变量正态分布，而且样本数 (N) 一般不应少于 30，当资料不服从正态分布或总体分布型未知，宜用 Spearman 或 Kendall 相关。Spearman 相关分析对原始变量的分布不作要求，属于非参数统计方法，适用范围要广些。对于服从 Pearson 相关系数的数据亦可计算 Spearman 相关系数，但统计效能要低一些。

相关系数 r 的值介于 $-1 \sim 1$ 之间， $-1 \leq r < 0$ ，为负相关； $0 < r \leq 1$ ，为正相关； $|r|$ 越趋于 1 表示关系越密切； $|r|$ 越趋于 0 表示关系越不密切； $r = 0$ ，并不表示“没有联系”，实际上，它只表明两变量间不存在线性联系。通常当 r 的绝对值大于 0.7，则认为两变量之间强相关，在 0.4—0.7 之间认为是中度相关，小于 0.4 认为是弱相关。

由于我们通常是通过抽样方法，利用样本研究总体的特性。但是由实际情况抽样而得到的数据总是存在抽样误差，即样本中两变量间相关系数不为 0，不能说明总体中两个变量间的相关系数不是 0，同样，样本中两变量间相关系数不为 0，也不能保证实际中这两个变量不相关，因此相关分析必须通过检验。检验的假设是：总体中两个变量间的相关系数为 0。SPSS 的相关分析过程中给出该假设成立的概率。一般的，我们给出假设成立概率 p 的阈值为 5%，当概率小于 5% 时，则认为原假设不成立，否则接受原假设，认为总体两变量相关系数为 0。

通过相关分析，可以了解遥感指标与地面产草量之间相关关系的密切程度，由此可以判断利用该遥感指标进行估产是否可行。

本文首选 Pearson 相关分析，首先检验数据是否来自正态分布总体，利用 K-S 检验即单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验 (one-sample Kolmogorov-Smirnov test) 进行正态分布检验，检验结果表明，使用的植被指数 RVI 不服从正态分布，因此文中统一采用 Spearman 相关分析，也方便前后互相比较。上述分析在 SPSS11.5 中完成。

(2) . 曲线拟和

回归分析是数理统计中常用的方法，它是用来研究变量与变量之间相关关系的。曲线拟和是回归分析的内容之一。由于大多数情况下，对已有的数据认识上往往是模糊不清的，不能辨别变量之间的准确关系，因此需要同时引入多种模型，最直接的方法是从 R^2 值的大小以及生成的图形本身进行比较来确定模型的优劣。文中用到的曲线拟合方式包括以下 10 种：

Linear: 拟合直线方程，即 $Y=b_0+b_1 \cdot X$

Logarithmic: 拟合对数方程，即 $Y=b_0+b_1 \cdot \ln X$

Inverse: 数据按 $Y=b_0+b_1 / X$ 进行拟和

Quadratic: 拟合二次方程，即 $Y=b_0+b_1 \cdot X+b_2 \cdot X^2$

Cubic: 拟合三次方程，即 $Y=b_0+b_1 \cdot X+b_2 \cdot X^2+b_3 \cdot X^3$

Compound: 拟合复合曲线模型，即 $Y=b_0 \cdot b_1^X$

Power: 拟合乘幂曲线模型, 即 $Y=b_0 \cdot X^{b_1}$

S: 拟合 S 型曲线, 即 $Y=e^{(b_0+b_1/X)}$

Growth: 拟合等比级数曲线模型, 即 $Y=e^{(b_0+b_1 \cdot X)}$

Exponential: 拟合指数方程, 即 $Y=b_0 \cdot e^{b_1 \cdot X}$

上式中, Y 代表产草量, X 代表选用的遥感指标。

(3). 多元回归

根据多个自变量的最优组合建立回归方程来预测因变量的回归分析称为多元回归分析。假定因变量 Y 与 p 个自变量 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 之间的回归关系可以用线性函数来近似反映, 多元线性总体回归模型的一般形式如下:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

其中, ε 是随机扰动项; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ 是总体回归参数。 β_j 表示在其他自变量保持不变的情况下, 自变量 X_j 变动一个单位所引起的因变量 Y 平均变动的单位数, 因而又叫做偏回归参数。

并不是所有的自变量都会对因变量 y 有显著的影响, 这就存在着如何挑选出对因变量有显著影响的自变量问题。当可供选择的自变量不太多时, 可以求出一切可能的回归方程, 然后用选元准则去挑出“最好”的方程。但是当自变量的个数较多时, 要求出所有可能的回归方程是非常困难的。为此, 人们提出了一些较为简便、实用、快速的选择“最优”方程的方法。人们所给出的方法各有有缺点, 至今还没有绝对最优的方法, 目前常用的方法有“前进法”、“后退法”、“逐步回归法”, 其中逐步回归最受推崇。本文亦选用逐步回归法。

逐步回归的基本思想是“有进有出”。具体做法是将变量一个一个引入, 引入变量的条件是其偏回归平方和经检验是显著的, 每引入一个自变量后, 对已选入的变量要进行逐个检验, 当原引入的变量由于后面变量的引入而变的不在显著时, 就将其剔除。引入一个变量或从回归方程中剔除一个变量, 为逐步回归的一步, 每一步都要进行 F 检验, 以确保每次引入新的变量之前回归方程中只包含显著的变量。这个过程反复进行, 直到既无显著的自变量选入回归方程, 也无不显著自变量从回归方程中剔除为止。这样就保证了最后所得的回归子集是“最优”回归子集。

建立了逐步回归方程后, 还需要进行统计检验, 以确定该回归方程是否有效。需要做的检验包括:

- a). 回归方程显著性检验: 利用 F 统计量对回归方程的总体显著性进行检验。
- b). 回归系数的显著性检验: 利用 T 统计量对回归系数的显著性进行检验。
- c). 方差齐性检验: 观察残差的散点图, 当残差图上的点的散步是随即、无任何规律时, 可认为模型的随机误差项的方差是齐性的。
- d). 序列相关性诊断: 利用 Durbin-Watson 检验, 当 DW 值接近 2 时, 可认为残差与自变量互为独立。
- e). 共线性诊断: 当出现多重共线性时, 就会出现整体拟合很好, 但个体估计很差的情况。其含意是: 整体的拟合有度 R^2 很大, 但个体参数估计值的 t 统计量却很小, 并且无法通过检验。由于波段间存在相关性, 多元回归中共线性诊断非常重要。可通过三项指标判断自变量间是否有共线性问题, 即容限度 (Tolerance)、方差膨胀因素 (variance inflation factor; VIF) 和条件指标 (Condition index; CI), 一般的判断标准是,

$Tolerance > 0.1$, $0 < VIF \leq 10$, $0 < CI \leq 30$ 时变量间不存在多重共线性。

在 SPSS 中进行逐步回归分析, 对数据进行两种变换: (1) 对数变化: 取 x 或 y 的对数形式, 或两者的对数形式; (2) 增加高次项: 用 x 的平方项, 三次项, 以及经过对数变化后的高次项等。对原数据、变换后的数据通过可能的组合进行逐步回归分析, 根据校正判定系数(Adjusted R^2)的大小选择最优回归方程, 同时要考虑必要的统计检验是否通过, 若没有通过则舍弃该方程。在逐步回归分析过程中, 回归系数的可信区间为 95%, 自变量进入方程的条件是显著性水平 $P < 0.05$, 从方程中剔除的条件是 $P > 0.10$ 。

1.5 研究区概况

内蒙古自治区位于祖国北部边疆, 地处北纬 $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'$, 东经 $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'$, 南北最宽处 1700 公里, 东西直线长达 2400 公里。内蒙古土地总面积 11830 万公顷, 占全国土地总面积的 12.4%, 其中草原面积 8800 万公顷, 占自治区土地总面积的 74.4%。

内蒙古属典型的中温带大陆性气候, 降水量少而分布不均, 年总降水量 50~450 毫米, 东北降水多, 向西部递减, 大部地区年降水不足 300 毫米, 西部的阿拉善高原年降水量少于 50 毫米, 降水集中于在 6~8 月份, 雨量约占全年的 75%。全区大部分地区年平均气温为 $0 \sim 8^{\circ}\text{C}$, 热量条件能够满足一年一熟制及牧草返青和生长需要。内蒙古地貌结构以高原、山地、平原的带状分布规律为特征, 地势大部分海拔在 1000~1500 米, 其平均值约在 1000 米左右。

内蒙古草原是欧亚大陆草原的重要组成部分, 也是目前世界上草原类型最多, 保存最完整的草原之一。代表着欧亚大陆草原众多草原类型的典型特征和天然草原生态系统的自然特性。内蒙古天然草原划分为 8 个类、19 个亚类、134 个组、476 个型。草原型占全国草原型的 58%。从东北向西南依次分布着温性草甸草原类、温性典型草原类、温性荒漠草原类、温性草原化荒漠类和温性荒漠类等 5 个地带性草原, 其中镶嵌分布着低平地草甸和沼泽等隐域性草原(见图 2-1)。

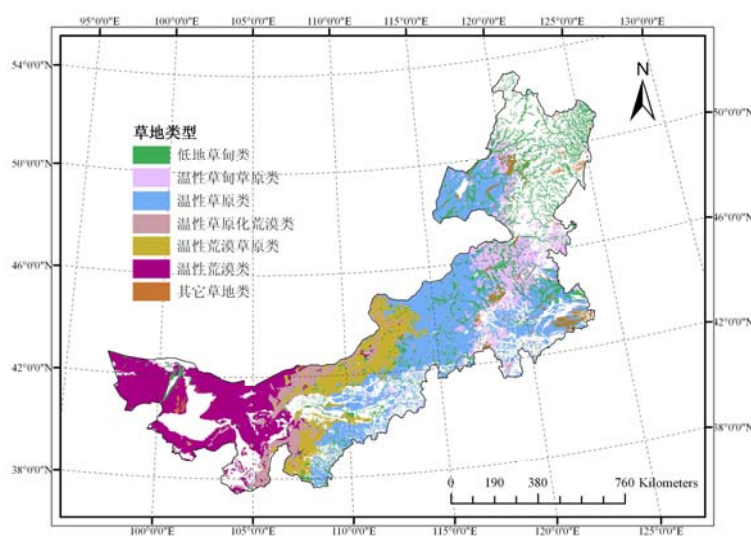


图 1-2 内蒙古草地类型图

Fig1-2. The distribution of grassland types in Inner Mongolia

第二章 数据的获取与处理

2.1 地面数据的获取与处理

本次研究选取内蒙古自治区的温性草甸草原、温性典型草原、温性荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠 5 种具有代表性的草地类型区，以农业部草原监理中心组织采集的地面样方调查数据为主要地面数据源。地面数据的采集时间为 2006 年的 7 月下旬至 8 月下旬。并对采集的样方数据进行标准化。最终将地面数据分为两部分，一部分用于建模分析；另一部分用于模型验证，数据量按一定的比例随机分配。最终用于建模的样点数为 205 个，用于模型验证的样点数为 45 个。样点的空间分布情况见图 2-1。

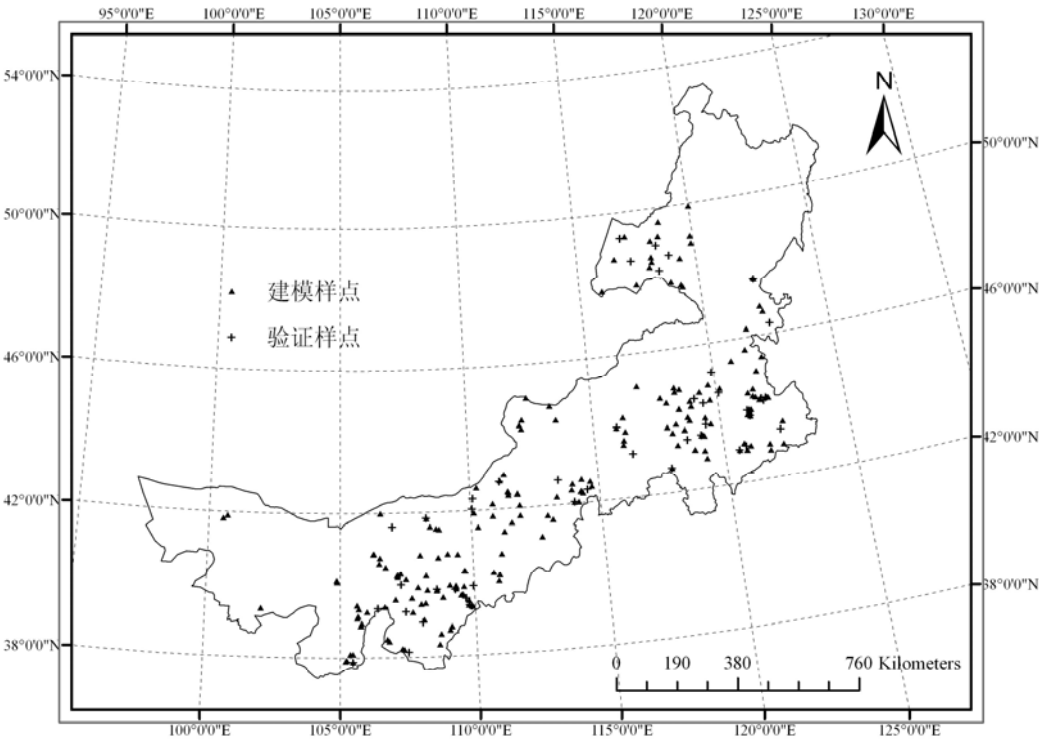


图 2-1 2006 年内蒙古地面样点分布图

Fig2-1.The distribution of sample plot in Inner Mongolia in 2006

2.2 遥感数据的获取与处理

本研究中使用过境时间不同但传感器相同的两种卫星数据，即TERRA/MODIS数据和AQUA/MODIS数据，这两种数据来源于NASA（美国国家航空航天局）的MODIS数据产品分发网

站 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>)。文中选择与地面采样同时相的 8 天合成的地表反射率产品, Terra 星的产品编号为MOD09A1, Aqua星的产品编号为MYD09A1, 时间范围为 2006 年 7 月 20 日—2006 年 8 月 28 日。数据格式为HDF, 空间分辨率为 500 米, 资料的版本为 4.0。此次发布的资料为经过验证了的资料, 认为产品精度已经达到要求, 为MODIS科学组推荐使用的产品。

2.2.1 MODIS 反射率产品

MODIS 反射率产品, 即 MOD09, 是由 MODIS1B 数据的前 7 个波段计算得到的包含 7 个波段反射率的产品 (各波段参数见表 2-1)。产品去除了大气的吸收和散射影响, 是对地面光谱反射的一种估计。大气校正是在云产品 (MOD35) 的基础上对气体、气溶胶和薄卷云的影响进行校正。

表 2-1 MODIS 前 7 个波段的参数

Tab.2-1 Information associated with Bnad1 to Band7 of MODIS

波段序号	波段宽度 nm	中心波长 nm	光谱灵敏度 W/m ² -μm-sr	信噪比
Band1	620—670	648	21.8	128
Band 2	841—876	858	24.7	201
Band 3	459—479	470	35.3	243
Band 4	545—565	555	29.0	228
Band 5	1230—1250	1240	5.4	74
Band 6	1628—1652	1640	7.3	275
Band 7	2105—2155	2130	1.0	110

MODIS 的 8 天反射率产品是在每天的反射率产品的基础上合成得到。通过总的像元质量和观测的覆盖范围来决定 8 天之内的最优观测值, 并通过 500 米的指示文件 (MODPTHKM) 进行地理位置上的匹配。同时提供了三种水平上的产品的质量信息, 它们分别是像元层次, 波段或分辨率层次, 和文件层次。

这些产品的质量都经过了验证, 即产品的不确定性被很好的定义在典型的条件范围内。虽然之后会出现改进型产品, 但并不影响这些产品用于目前的科学研究。

反射率产品数据集共包含了前 7 个波段的反射率, 还包括对应的 2 个质量信息参数, 3 个与“太阳—目标物—传感器”位置有关的参数, 1 个记录产品时间的参数, 共 13 个参数, 即 Surface Reflectance for band 1 (620-670 nm), Surface Reflectance for band 2 (841-876 nm), Surface Reflectance for band 3 (459-479 nm), Surface Reflectance for band 4 (545-565 nm), Surface Reflectance for band 5 (1230-1250 nm), Surface Reflectance for band 6 (1628-1652 nm), Surface Reflectance for band 7 (2105-2155 nm), Surface reflectance 500m quality control flags, Solar zenith, View zenith, Relative azimuth, Surface reflectance 500m state flags, Surface reflectance day of year。为方便存储, 反射率值扩大了 10000 倍。

2.2.2 反射率产品质量检查

卫星遥感信息产品是由星载遥感仪器观测的数据经科学方法处理得到的，由于观测数据受地球大气和地表、太阳位置以及星上仪器工作状态、定标和定位精度等多种因素的影响，卫星遥感信息产品必须经过质量控制、误差分析之后才可以使用。有很多例子说明，MODIS 的陆表产品必须考虑相关的质量评价结果后使用它才有意义（Jeffrey T.M. et al,2002）。Shunlin Liang 利用地面测量数据对 MODIS 的部分陆地产品进行了初步验证，其方法是：地面实测数据—ETM+影像—重采样为 1KM—与 MODIS 产品进行比较。被验证的产品包括 (1) 经过大气校正的双向反射率产品 (MOD09), (2) 双向反射率分布函数产品 (BRDF) (MOD43B1), (3)反照率产品(MOD43B3), (4) BRDF 订正的天底反射率产品 (MOD43B4)，通过验证结果表明，这些产品有着相当好的精度，绝对误差小于 5%(Shunlin Liang,et al,2002)

从遥感资料获得的全球长序列科学数据集对环境和气候变化的应用是非常重要的。但是对这些资料的解释和应用必须考虑精度和质量，要能够正确区分是自然变化还是人为因素造成的变化。对于从 MODIS 数据反演得到的全球陆表参数产品数据集，质量评价是整个产品链中一个重要的环节。质量评价主要从产品生成的科学性和产品的性能两方面考虑（David P.R. et al,2002）。SDS 产品并不意味着没有缺陷，但是很清楚地记录了哪些像元可能存在哪些质量问题，以便让数据用户根据研究要求决定是否使用这些像元，进行恰如其分的分析。MODIS 陆表产品数据质量控制结果用像元方式存储，并以波段的形式存储在产品数据文件的元数据中，由经过压缩的 32-bit 数据组成。这些质量信息通过专门的软件解压后，可以像普通影像文件一样显示和分析。

本研究中基于 IDL6.1 编写了专门的读取产品质量信息的程序。通过读取相应波段的质量控制信息，保留质量最好的像元（即 00 -- corrected product produced at ideal quality -- all bands，各字节代表的意思可具体参考 MODIS 产品网站上的详细说明），其它像元单独标记，生成每个波段的质量信息图，利用此图对相应波段进行掩膜处理。这样充分保证最后结果受遥感数据的质量影响最小。

质量检查后，所有数据转换为统一的格式，其投影采用 Albers 等面积割圆锥投影（Albers Conical Equal Area）。具体参数见表 2—2：

表 2—2 投影参数
Tab.2-2 Parameters of projection

参数	取值
椭球体	Krasovsky
基准面	Krasovsky
第一标准纬线	25
第二标准纬线	47
中央经线	105
中央纬线	0
东向偏移量	0
北向偏移量	0

500 米分辨率的反射率产品是以每年的第 1 天开始, 每 8 天合成一个文件。文件的空間位置是该文件在 SIN 地图投影中的位置, 每个文件覆盖范围 1200km~1200km, 地图投影 SIN。研究中选择时间上与地面采样最接近的产品, 分别选取 2006 年 7 月 20 日至 7 月 28 日, 7 月 29 日至 8 月 5 日, 8 月 6 日至 8 月 14 日, 8 月 15 日至 8 月 23 日, 共 4 个时间段的 24*2 幅产品影像。利用 MODIS 产品专门处理工具 MRT 软件对下载的产品进行文件格式、空间镶嵌和地图投影的转换, 输出的文件最后为 Albers 投影(<http://edcdaac.usgs.gov/datatools.asp>)。在 IDL6.1 中编写代码读取每一副图像中的质量控制波段 (Surface reflectance 500m quality control flags), 根据质量控制波段中不同字节代表的质量水平, 对有质量问题的像元进行标记。有质量问题的像元不参与建模分析、验证和模型的应用。充分保证最佳质量的遥感数据参与运算, 保证结果的可靠性。

2.2.3 植被指数计算

根据植被的光谱特性, 将卫星可见光和近红外波段进行组合, 形成了各种植被指数。植被指数是遥感领域中用来表征地表植被覆盖, 生长状况的一个简单, 有效的度量参数。目前已经定义了 40 多种植被指数, 本研究中选择了 9 种已有的植被指数和新构造了 12 种包含短波红外波段的植被指数用于产草量的估算, 它们分别是:

1) 归一化植被指数(NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) (Tuck C.J.,1979)

在植被遥感中, NDVI 的应用最为广泛。许多研究表明 NDVI 与 LAI、绿色生物量、植被覆盖度、光合作用等植被参数有关, 是植被生长状况及植被覆盖度的最佳指示因子。其计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

式中: ρ_{NIR} 和 ρ_R 分别为近红外和红波段的反射率; $-1 \leq NDVI \leq 1$, 负值表示地面覆盖为云、水、雪等, 对可见光高反射; 0 表示有岩石或裸土等, NIR 和 R 近似相等; 正值, 表示有植被覆盖, 且随覆盖度增大而增大;

2) 增强型植被指数 (EVI, Enhanced Vegetation Index) (Liu H.Q.&Huete A.R.,1995)

MODIS-EVI 采用“大气抵抗植被指数”对残留的气溶胶做了进一步校正。在对所有输入波段做大气校正的基础上, 采用“大气抵抗植被指数(Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI)”, 对残留气溶胶做了进一步校正, 基本原理是: 大气气溶胶对 Blue 和 Red 散射程度不同, 气溶胶越厚, 二者差别越大, 因此可以通过 Blue 和 Red 的差别反过来补偿气溶胶对 Red 的影响。

MODIS-EVI 采用“抗土壤植被指数”对土壤背景影响做了校正。对土壤背景干扰的处理, 采用了 Huete 提出的抗土壤植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI)。

Liu 和 Huete 在把 ARVI 和 SAVI 综合在一起时发现, 土壤和大气互相影响, 减少其中一个噪音可能增加了另一个, 于是通过参数构建了一个同时校正土壤和大气的反馈机制, 即“增强型植被指数”(Enhanced Vegetation Index,EVI):

$$EVI = \frac{2.5 * (\rho_{NIR} - \rho_R)}{\rho_{NIR} - C_1 * \rho_R + C_2 * \rho_{BLUE} + L}$$

式中： ρ_{NIR} 、 ρ_R 、和 ρ_{BLUE} 指预先经比较严格的大气校正的近红外和可见光的红、蓝波段的反射率。 L 为背景（土壤）调整系数， C_1 、 C_2 为拟合系数，描述了用蓝通道对红通道进行大气气溶胶散射修正， C_1 、 C_2 和 L 分别取 6.0、7.5 和 1.0。

3) 三波段梯度植被指数(TGDVI, Three-band Gradient Difference Vegetation Index)(唐世浩等, 2003)

一般来说，植被在绿光波段有一个低反射峰，在近红外波段有一个高反射峰，在红光波段为一个吸收谷，而土壤光谱在绿到近红外波段近似线性变化。根据上述植被和土壤的光谱特点，构建如下形式三波段梯度差植被指数（TGDVI）：

$$TGDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\lambda_{NIR} - \lambda_R} - \frac{\rho_R - \rho_G}{\lambda_R - \lambda_G}$$

式中： ρ_{NIR} 、 ρ_R 、和 ρ_G 分别为近红外、红、绿波段的反射率； λ_{NIR} 、 λ_R 、和 λ_G 为相应波段的波长。分析该植被指数可以看出，随植被增加，绿光和近红外反射率增加、红光反射率减小，该植被指数增大；反之，该指数减小，对于植被来说，TGDVI 一般不会小于 0。

TGDVI 物理意义明确，计算简单，与 NDVI 一样不需要太多的参数，并具有一定的消除背景和薄云影响的能力，同时该植被指数还解决了 NDVI 饱和点低的问题。

4) 修改型土壤调整植被指数(MSAVI, Modified Soil Adjusted Vegetation Index)(Qi J.et al,1994)

Qi J.et al. (1994) 发展了修改型土壤调整植被指数（MSAVI），用一个自动调节因子 L 取代了 SAVI 中的土壤调节因子来减少裸土的影响，表示为：

$$MSAVI = \left[\left(2 * \rho_{NIR} + 1 \right) - \sqrt{\left(2 * \rho_{NIR} + 1 \right)^2 - 8(\rho_{NIR} - \rho_R)} \right] / 2$$

式中： ρ_{NIR} 、和 ρ_R 分别为近红外、红波段的反射率。MSAVI 可以直接从卫星影像资料或近地面光谱辐射观测资料得到，对于从卫星影像直接求解区域中的植被指数较为方便又可以消除土壤的影响。

5) 绿色归一化植被指数(GNDVI, Green Normalized Difference Vegetation Index)(Gitelson A.A.et al,1996)

Gitelson A. et al. (1996) 的研究发现，绿波段与叶绿素含量高度相关，决定系数达到了 0.95 以上，因此提出了 Green NDVI，即 GNDVI；这一新的指数的动态变化范围比 NDVI 宽，并且对叶绿素浓度的敏感性至少是 NDVI 的 5 倍，计算公式如下：

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_G}{\rho_{NIR} + \rho_G}$$

式中： ρ_{NIR} 和 ρ_G 分别为近红外和绿波段的反射率，即 Band2 和 Band4 的反射率。

6) 差值植被指数(DVI, Difference Vegetation Index)(Richardson A.J.&Wiegand C.L.,1977)

$$DVI = \rho_{NIR} - \rho_R$$

式中： ρ_{NIR} 、和 ρ_R 分别为近红外、红波段的反射率；适用于植被发育早—中期，或低—中覆盖度的植被检测。

7) 比值植被指数(RVI, Ratio Vegetation Index) (Jordan C.F.,1969)

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R}$$

式中： ρ_{NIR} 、和 ρ_R 分别为近红外、红波段的反射率。RVI 能增强植被与土壤背景间的辐射差异，土壤一般有近于 1 的比值，而植被则会表现出高于 2 的比值。RVI 是绿色植物的一个灵敏的指示参数，研究表明：它与叶面积指数、叶干生物量、叶绿素含量相关性高，被广泛用于估算和监测绿色植物生物量。

8) 重归一植被指数 (RDVI, Re-normalized Difference Vegetation Index) (Roujean J.L.&Breon F.M.,1995)

Roujean 和 Broen(1995)提出了一个介于 DVI 与 NDVI 之间的重归一化植被指数 RDVI，表示为：

$$RDVI = \sqrt{NDVI \times RVI} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\sqrt{\rho_{NIR} + \rho_R}}$$

式中： ρ_{NIR} 、和 ρ_R 分别为近红外、红波段的反射率。RDVI 取 DVI、NDVI 两者之长，可用于低高不同植被覆盖情况下。

9) 优化土壤调节植被指数 (OSAVI, Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index) (Genevieve R. et al,1996)

Genevieve Rondeaux 等 (1996)，验证并比较了 NDVI、SAVI、TSAVI、MSAVI、和 GEMI 对土壤影响的敏感性。通过 SAIL 模型模拟了指数在沙土、粘土、泥炭土类在不同的水分条件和粗糙度条件下的表现，确定了用来减少土壤背景影响的优化值 $X=0.16$ 。结果表明， $X=0.16$ 在低的或高的植被覆盖的情况下都能有效的减少土壤噪声的影响，并且不需要土壤线参数的先验知识。公式如下：

$$OSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + X}$$

式中： ρ_{NIR} 、和 ρ_R 分别为近红外、红波段的反射率。

10) 其它植被指数

前面介绍的 9 种植被指数，主要是利用绿色植物强吸收的可见光红波段和绿色植物高反射和高透射的近红外波段，对这两个波段利用比值、差分、线性组合等多种组合来增强或揭示隐含的植物信息。

在 MODIS 数据的前 7 个波段中，还包括了三个短波红外波段，即 Band5、Band6 和 Band7，遥感器所接受的这三个波段的能量主要来自地面物体的反射辐射，其中，Band6 和 Band7 分别受两个水分吸收带的控制，对植物水分敏感。从下图中也可以看出，随着植被盖度的增加，植被对 Band6 和 Band7 的吸收增强，对 Band5 的反射与 Band2（近红外）相近。根据已有的研究，对这三个波段在植被监测中的应用报道较少。因此，本文通过这三个波段与其它波段的不同组合构建 12 种新的植被指数，以期能够提高草原产草量估算精度。

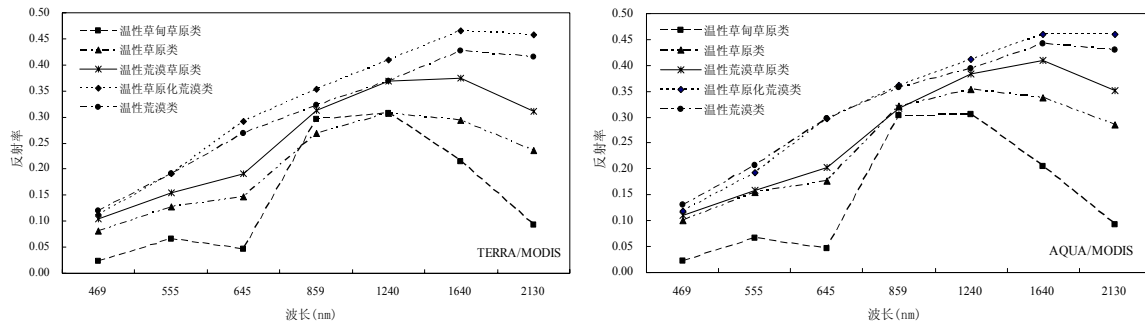


图 2-2 位于典型草原类型的样点反射光谱

Fig. 2-2 Samples reflectance spectroscopy located in typical grassland types

12 种新构造的植被指数的计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 VI_1 &= \frac{\rho_{Band 6} * \rho_{Band 1}}{\rho_{Band 2}} & VI_2 &= \frac{\rho_{Band 2}}{\rho_{Band 1} + \rho_{Band 7}} \\
 VI_3 &= \frac{\rho_{Band 2}}{\rho_{Band 1} + \rho_{Band 6}} & VI_4 &= \frac{\rho_{Band 2}}{\rho_{Band 6}} \\
 VI_5 &= \frac{\rho_{Band 2}}{\rho_{Band 7}} & VI_6 &= \frac{\rho_{Band 2}}{\rho_{Band 7} + \rho_{Band 6}} \\
 VI_7 &= \frac{\rho_{Band 6}}{\rho_{Band 7}} & VI_8 &= \rho_{Band 6} + \rho_{Band 7} \\
 VI_9 &= \rho_{Band 6} - \rho_{Band 7} & VI_{10} &= \frac{\rho_{Band 2} - \rho_{Band 5}}{\rho_{Band 2} + \rho_{Band 5}} \\
 VI_{11} &= \frac{\rho_{Band 2} - \rho_{Band 3}}{\rho_{Band 3} + \rho_{Band 6}} & VI_{12} &= \frac{\rho_{Band 2} - \rho_{Band 4}}{\rho_{Band 4} + \rho_{Band 6}}
 \end{aligned}$$

由于 NASA 提供的 MODIS 反射率产品经过了严格的辐射校正和几何校正，因此在质量检查后，即可用来计算其它指数和分析。为叙述方便下文中均使用各植被指数的简称。

2.2.4 植被指数的提取

基于像元的数理统计回归分析方法通过在不同尺度的数据之间建立函数关系来完成有局部的点到整个面的转换，这就需要从遥感影像中提取地面样点对应像元的信息。大多数的研究中采用的是“点一面”采样法，即提取遥感影像上地面样地所在点周围几个像元的平均值与之对应，一般取 3*3 窗口内的像元的均值，这里提取的均值有研究者使用植被指数的平均值，也有研究者先计算各波段反射率的平均值再计算植被指数；陶伟国等（2006）曾以样点所在位置为中心建立缓冲区，以这个缓冲区之内的像元的均值作为“面”的值与地面样点对应，通常为周围 3~4 个像元的平均值，认为这样取值更好的考虑了样点在像元中的空间位置情况，因此更为合理(陶伟国等，2006)。“点一面”采样的目的主要是要消除样点与遥感影像空间匹配上的误差，但一定程度上也

削弱了遥感信息对产量变化的敏感性。

本研究中采用“点一点”采样法，即地面上的一个观测值对应一个像元值，这是因为本文所用的资料是经过验证了的资料，认为产品精度已经达到要求，为 MODIS 科学组推荐使用的产品。2001 年 10 月最后一次调整 MODIS 仪器参数后，MODIS 星下点的地理定位精度达到了：标准偏差为 50m。因此采用“点一点”采样法就能够保证更高的匹配精度。

第三章 估算模型的建立

本章主要讨论利用 TERRA 星和 AQUA 星上的 MODIS 反射率产品包含的 7 个波段和不同波段组合生成的多种植被指数与地面产草量建立统计模型。建立的统计模型可分为四大类，第一类：基于单波段建立模型；第二类：建立单颗卫星和两颗卫星的多波段模型；第三类：利用已有的 9 种植被指数建立模型；第四类：利用新构造的 12 种植被指数建立模型。建模的过程为：相关分析——建立相应的模型。相关分析的目的在于，了解遥感指标与地面产草量之间相关关系的密切程度，由此判断利用该遥感指标进行估产是否可行。

3.1 单波段模型

3.1.1 相关分析

由表 3—1 中 TERRA/MODIS 上的 7 个波段与产量间以及各波段间的相关分析结果可见，Band1、Band3 和 Band 7 与研究区实测地面鲜草产量之间强相关，Band4 和 Band 6 与产草量之间中度相关，相关均达极显著；Band2 和 Band5 与产草量之间弱相关，相关不显著。

由表 3—2 中 AQUA/MODIS 上的 7 个波段与产量间以及各波段间的相关分析结果可见，Band1、Band3、Band4、Band 6 和 Band 7 与研究区实测地面鲜草产量之间中度相关，相关均达极显著；Band2 和 Band5 与产草量之间弱相关，相关不显著。

表 3—1 相关分析结果

Tab.3-1 Results of correlation

相关系数	产草量	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7
产草量	1.000**	-0.731**	0.112	-0.710**	-0.654**	-0.091	-0.599**	-0.725**
Band 1		1.000**	0.325**	0.971**	0.977**	0.497**	0.873**	0.935**
Band 2			1.000**	0.322**	0.438**	0.880**	0.480**	0.301**
Band 3				1.000**	0.978**	0.469**	0.822**	0.886**
Band 4					1.000**	0.574**	0.857**	0.887**
Band 5						1.000**	0.728**	0.545**
Band 6							1.000**	0.956**
Band 7								1.000**

注：**表示显著性水平为 0.01；Band1~Band7 指 TERRA/MODIS 的前 7 个波段

表 3-2 相关分析结果

Tab.3-2 Results of correlation

相关系数	产草量	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7
产草量	1.000**	-0.690**	0.110	-0.670**	-0.628**	-0.095	-0.544**	-0.659**
Band 1		1.000**	0.300**	0.963**	0.977**	0.500**	0.818**	0.910**
Band 2			1.000**	0.240**	0.416**	0.847**	0.385**	0.285**
Band 3				1.000**	0.956**	0.428**	0.771**	0.876**
Band 4					1.000**	0.577**	0.804**	0.874**
Band 5						1.000**	0.659**	0.569**
Band 6							1.000**	0.911**
Band 7								1.000**

注： **表示显著性水平为 0.01； Band1~Band7 指 AQUA/MODIS 的前 7 个波段

对于两颗卫星，MODIS 传感器的前 7 个波段中，Band1, Band3, Band 4, Band 6 和 Band 7 均与产量呈负相关关系，并且相关关系十分显著；Band5 与产量呈负相关趋势，Band2 与产量呈正相关趋势，相关均不显著（见图 3-1）。

整体上，两颗星上的各波段与产量的关系大小顺序基本一致，但 TERRA/MODIS 上的 7 个波段与产量的相关关系较 AQUA/MODIS 上的 7 个波段与产量的相关关系高。

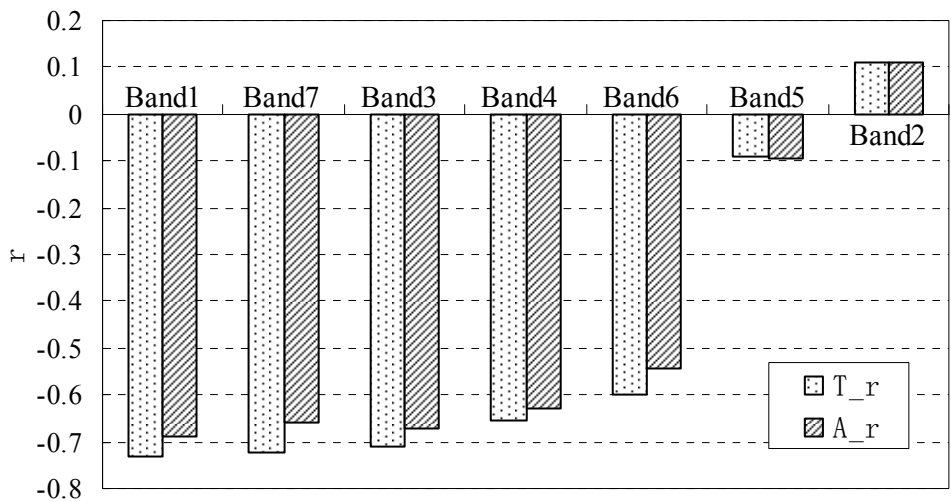


图 3-1 相关系数柱状图。图中 T_r 指基于 TERRA/MODIS 数据算出的相关系数；A_r 指基于 AQUA/MODIS 数据算出的相关系数

Fig.3-1 The Histogram of Correlation Coefficient. T_r means the correlation coefficient is calculated by TERRA/MODIS data; A_r means the correlation coefficient is calculated by AQUA/MODIS data

3. 1. 2 建立模型

本文取相关系数大于 0.7 的波段（达到强相关）作为遥感指标建立模型，即只考虑

TERRA/MODIS 星上的 Band1, Band3 和 Band 7 三个波段,其它波段因与产量相关性较低不予考虑。

单波段与产量的相关关系最好的为红波段 (Band1, $R=-0.731$), 从已有的研究结果看, 红波段常用于生物学参数的估算研究。Graetz(1988)发现, 在土壤背景反射率较高的情况下, RED 指数比植被指数更适合于估算植被盖度 (Graetz R.D.et al,1988)。TODD S.W. (1998) 的研究表明, 当放牧处理作为虚拟变量进入模型之后, RED 指数与生物量的关系优于 GVI、BI、WI 和 NDVI (Todd S.W. et al, 1998)。利用其它两个波段建立估算模型的讨论较少。对三个波段与产草量建立一元回归估算模型, 通过 10 种拟和方式, 共得到 30 个拟和方程。

通过 F 检验、T 检验和决定系数 (R^2) 的大小的比较, 最后得到各波段的最适模型, 见表 3—3。

表 3—3 基于各波段的最适模型

Tab.3-3 Optimum equation based on single band

数据	波段(自变量 x)	模型	R^2
TERRA/MODIS	Band1	$y = -3363.2 + (7.6E+07/x)$	0.527
	Band3	$y = 519667 - 70460 * \ln x$	0.511
	Band7	$y = -15985 + 1.6E+08 / x$	0.519

注: Band1、Band3 和 Band7 为反射率值扩大 10000 倍。y 表示产草量, 单位为 $kg/0.25km^2$; 以上方程均通过 0.01 水平下的统计检验。

Band1(红波段)位于叶绿素的主要吸收带; Band3(蓝波段)也位于绿色植物的吸收区(450nm~500nm), 对叶绿素浓度反映敏感; Band7(短波红外波段)位于水的吸收带(1900、2700nm)之间, 受两个吸收带的控制, 对植物水分敏感。因此, 随着草原植被地面生物量的增加, 叶绿素含量增加, 对红波段和蓝波段的吸收增加, 同时植被含水量也在增加, 植被水分对 Band7 的吸收增强。这三个波段反射率的变化均是有植被对光谱的吸收引起的, 所以散点图比较相似。下面给出 Bnad1(红波段)与产草量之间的散点图:

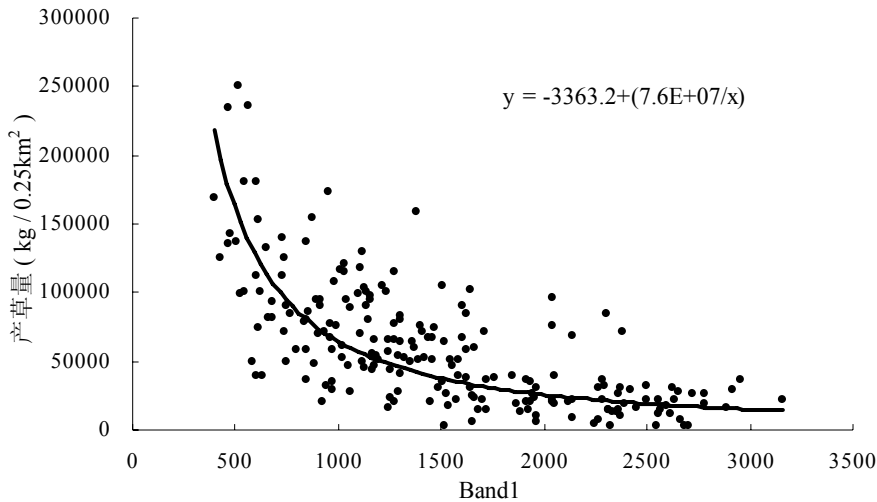


图 3—2 单波段与产量之间的散点图; Band1 表示第一波段的反射率,扩大了 10000 倍。

Fig.3-2 Scatter plots of production versus Band1 from surface reflectance product of MODIS. The value of Band1 enlarged to 10000 times

3.1.3 小结

从相关分析可以看出, TERRA/MODIS 上的 7 个波段与产量的相关关系较 AQUA/MODIS 上的 7 个波段与产量的相关关系高, 其中 Band1 (即红波段) 与产草量的相关性最高 ($r=-0.731$)。

在建立的单波段回归方程中, Band1 (红波段) 与产量之间建立的倒数模型的决定系数最高; 经 F 检验, 在 0.01 水平下回归方程显著; 经 T 检验, 参数通过了 0.01 水平下的统计检验, 即为单波段最适模型。其它两个波段 Band3 和 Band7 略差, 但差别并不显著。

3.2 多波段模型

单波段模型只利用了一个波段中包含的植被信息, 一定程度上浪费了其它波段所包含的植被信息, 并且通常草原植被覆盖度低, 单个波段容易受背景影响不易提取稳定的植被信息, 因此利用其它波段中包含的植被信息, 通过多个波段的线性组合或增加非线性项来进一步提高对植被信息的提取。刘占宇等 (2006) 逐步回归分析方法, 建立生物量高光谱遥感估算模型, 结果表明: 生物量与高光谱吸收特征参数变量的分析中, 以 840、1132、1579、1769 和 2012 nm 等 5 个原始高光谱波段反射率为变量的逐步回归估算方程为最佳模型, 估算精度为 91.6% (刘占宇等, 2006)。Rick L, et al(1997)的研究显示, 包含红波段和近红外波段的多元回归模型为最优模型, 能够解释植被盖度变化的 75%, 优于 GVI,SR,NDVI,SAVI,OSAVI,TSAVI 和 MSAVI (Rick L.L.&William J.R.,1998)。

本节中利用 MODIS 的 7 个波段建立多元回归模型, 通过多个波段信息的综合来提高模型的估算精度。对于不同卫星建立不同的回归模型, 并联合两颗卫星共 14 个波段来探讨模型的精度是否能够被进一步提高。

3.2.1 建立模型

通过分析, 数据变换后 R^2 略有增加, 但模型的多重共线性问题严重, 未通过统计检验, 最后对不同数据源建立的多波段回归方程中只包含原始波段数据。建立的方程如下:

基于 TERRA/MODIS 数据的最适多波段模型:

$$y = 28565 - 373147.9\rho_{T_Band2} + 649489.1\rho_{T_Band3} - 149972.1\rho_{T_Band7} \quad (1)$$

基于 AQUA/MODIS 数据的最适多波段模型:

$$y = 20963 - 441334.5\rho_{A_Band1} + 326032.5\rho_{A_Band2} \quad (2)$$

基于 TERRA/MODIS 和 AQUA/MODIS 数据的最适多波段模型:

$$y = 3993.2 - 523167.8\rho_{T_Band3} + 330838.5\rho_{T_Band5} - 239727.8\rho_{T_Band7} + 115823.7\rho_{R_Band2} \quad (3)$$

其中：y 表示产草量，单位为 kg/0.25km²； ρ_{T_Band2}， ρ_{T_Band3}， ρ_{T_Band5} 和 ρ_{T_Band7} 分别为 Terra 星的 Band2、Band3、Band5 和 Band7 的反射率； ρ_{A_Band1} 和 ρ_{A_Band2} 分别为 Aqua 星的 Band1 和 Band2 的反射率； y 表示产草量，单位为 kg/0.25m²。方程中，常数项并无实际意义。对方程的统计检验结果见表 3—4。

表 3—4 统计检验结果
Tab.3-4 Results of statistic test

		TERRA	AQUA	TERRA 和 AQUA
包含的波段		Band2, Band3	Band1, Band2	T_Band3, T_Band5
		Band 7		T_Band7, A_Band2
拟和优度	Adjusted R ²	0.675	0.613	0.689
方程的显著性检验	P 值	0.000	0.000	0.000
	容限度	通过	通过	通过
多重共线性检验	方差膨胀因子	通过	通过	通过
	条件指标	通过	通过	通过
方差齐性检验	残差图	随机分布	随机分布	随机分布
序列自相关检验	DW 值	1.776	1.821	1.705

注：表中 T_Band3、T_Band5 和 T_Band7 分别指 TERRA/MODIS 数据的 Band3、Band5 和 Band7，A_Band2 指 AQUA/MODIS 数据的 Band2。Adjusted R² 指消除了自变量个数影响的 R² 的修正值。

统计检验结果显示：经 F 检验， P=0.000<0.01，故回归方程十分显著，即可以以 99%的概率断言自变量对因变量（产草量）产生显著影响；经 Durbin-Watson 检验，DW 值接近 2，可以认为模型不存在序列自相关；容限度（Tolerance），方差膨胀因子（Variance inflation factor, VIF）和条件指标（Condition Index）三个条件均符合，所以回归方程中不存在多重共线性的问题。观察其残差分布情况，残差图上的点随机分布无规律，表明回归模型不存在异方差问题。

对于方程(1), Adjusted R²=0.675, 说明产量变化的 67%可以由 T_Band2, T_Band3 和 T_Band 7 这三个变量进行解释；对于方程（2），Adjusted R²=0.613，即产量变化的 61%可以由 A_Band1 和 A_Band2 这两个变量进行解释；对于方程（3）Adjusted R²=0.689，即产量变化的 69%可以由 T_Band3, T_Band5, T_Band7 和 A_Band2 这四个变量进行解释。

通过多波段逐步回归，提高了对产量的估算精度，相比单波段，R² 值明显提高，这是因为多个波段的线性组合相比单个波段包含了更多的植被信息，因此优于单波段对产量的表达。三个方程中，双星回归方程的决定系数最高，Adjusted R²=0.689；其次为基于 TERRA 星的回归方程，Adjusted R²=0.675；最后为基于 AQUA 星的回归方程，Adjusted R²=0.613。

不同卫星经逐步回归之后的方程中包含的波段不同，随包含的波段数的减少 Adjusted R² 也相应减小。基于 TERRA 星的回归方程包含了三个波段，即 Band2、Band3 和 Band7；基于 AQUA 星的回归方程则包含了两个波段 Band1 和 Band2；可以发现：（1）都是高反射波段和强吸收波段

的组合；(2) 尽管相关分析显示近红外波段与产量呈弱相关，但逐步回归方程中都包含了这一波段，说明近红外波段在植被遥感监测中不可忽视；(3) Band3 (蓝波段) 和 Band1 (红波段) 都受叶绿素含量的控制，都被叶绿素强吸收，Band7 位于水的吸收带，对植物水分敏感。对 TERRA/MODIS 的回归方程中多了一个水分吸收波段是因为，TERRA 星是早晨 10:30 过境，而 AQUA 星是下午 1:30 过境，本研究中数据获取的时间为盛夏，下午 1:30 的时候地面温度已接近一天中的最高温度，植物叶片萎蔫，通过水分吸收来间接反映植被信息的 Band7 对植被的指示能力减弱。

基于双星的回归方程则包含了四个波段，即 Terra 星的 Band3, Band5, Band7 和 Aqua 星的 Band2；综合了两颗星的信息，能够更多的解释产量的变化，但是增加并不明显。

3.2.2 小结

综合判断，基于双星的 Adjusted R^2 高，但对产量变化的解释与基于 TERRA 数据的回归方程基本是相同的 (Adjusted R^2 的变化仅为 0.014)，由于利用了两颗星上的不同波段，数据处理量大大增加。而基于 TERRA/MODIS 数据的回归方程包含的波段数量不多，又有相对较高的 R^2 值，因此相比之下基于 TERRA/MODIS 数据的回归方程是最适多波段估算模型。

3.3 植被指数模型 I

本节主要讨论利用 9 种已有的植被指数来构建估算模型。植被指数包括: NDVI、EVI、MSAVI、GNDVI、TGDVI、DVI、RVI、RDVI 和 OSAVI。这些植被指数的共同点是，主要利用了绿色植被在红波段和近红外波段处截然相反的反射特征，叶绿素在红波段强吸收，叶内细胞结构对近红外波段高反射；其次，这些植被指数部分已被用于内蒙古草原产量的遥感监测，但只是其中几个的相互比较，缺乏在统一的大样本数据基础上的比较。

史培军等 (1994) 以锡林郭勒草原为例利用 NDVI 和 RVI 建立了大面积草地遥感估产模型 (史培军等, 1994)。赵冰茹等 (2004) 初步探讨了利用 MODIS-NDVI 进行草地估产研究的可行性 (赵冰茹等, 2004)。王艳荣 (2004) 研究了内蒙古草原植被近地面反射波谱特征与地上生物量的相关关系，并利用 NDVI、RVI 和 PVI 建立了估产模型 (王艳荣, 2004)。王正兴等 (2005) 利用由 MODIS 计算得到的 EVI 和 NDVI 及同期地上生物量 (ANPP) 资料，按照 5 个月份、4 种草地类型、2 种植被指数，分别建立了 VI-ANPP 的线性模型和幂模型 (王正兴等, 2005)。李素英等 (2007) 以锡林浩特市为例，利用 NDVI、RVI、SAVI、MSAVI 和 RSR 建立了与地面生物量的回归模型，得出 NDVI—生物量模型优于其它植被指数模型 (李素英等, 2007)。陶伟国等 (2007) 在内蒙古草原利用 NDVI、EVI、MSAVI 和 OSAVI 根据草原利用状况分类建立了遥感估算模型 (陶伟国等, 2007)。

由此可见，在统一的数据平台上利用多个植被指数进行建模，并进行统一的对比分析对于内蒙古区域草原产草量的准确估算是非常有必要的。

3.3.1 相关分析

从表 3—5 和表 3—6 中的结果可以看出,无论是 TERRA 星还是 AQUA 星,植被指数与产草量之间的相关关系相比单波段与产量的关系都有了明显提高,所有指数与产量的相关系数都大于 0.7,且均达极显著,因此可作为遥感指标与产量建立估算模型。

不同指数与地上产草量的相关性存在一定的差别。对于 TERRA 数据,各指数与产量的相关关系由高到低的顺序为:RDVI>OSAVI=MSAVI>NDVI=RVI>TGDVI>GNDVI>DVI>EVI;对于 AQUA 数据,各指数与产量的相关关系由高到低的顺序为:RDVI=MSAVI>OSAVI>TGDVI>RVI>NDVI>DVI>GNDVI>EVI。

各波段之间相关性较高,并且均达极显著。除 EVI 与其它指数相关关系相对较低外,其它各指数之间的相关关系都非常高,达到了 0.9 以上。

表格 3—5 基于 TERRA/MODIS 数据的相关分析结果

Tab.3-5 Results of correlation based on TERRA/MODIS data

相关系数	产草量	NDVI	EVI	GNDVI	MSAVI	TGDVI	OSAVI	DVI	RVI	RDVI
产草量	1.000**	0.822**	0.776**	0.812**	0.829**	0.817**	0.829**	0.810**	0.822**	0.833**
NDVI		1.000**	0.845**	0.986**	0.972**	0.974**	0.994**	0.931**	1.000**	0.982**
EVI			1.000**	0.844**	0.930**	0.888**	0.887**	0.959**	0.845**	0.914**
GNDVI				1.000**	0.949**	0.937**	0.975**	0.906**	0.986**	0.962**
MSAVI					1.000**	0.990**	0.990**	0.989**	0.971**	0.998**
TGDVI						1.000**	0.988**	0.973**	0.973**	0.991**
OSAVI							1.000**	0.962**	0.994**	0.996**
DVI								1.000**	0.931**	0.980**
RVI									1.000**	0.982**
RDVI										1.000**

注：**表示显著性水平为 0.01；NDVI、EVI、GNDVI、MSAVI、TGNVI、OSAVI、DVI、RVI 和 RDVI 为不同的植被指数，参见第二章的植被指数计算。

表格 3—6 基于 AQUA/MODIS 数据的相关分析结果

Tab.3-6 Results of correlation based on AQUA/MODIS data

相关系数	产草量	NDVI	EVI	GNDVI	MSAVI	TGDVI	OSAVI	DVI	RVI	RDVI
产草量	1.000**	0.798**	0.704**	0.787**	0.811**	0.806**	0.810**	0.797**	0.799**	0.811**
NDVI		1.000**	0.815**	0.986**	0.973**	0.973**	0.995**	0.932**	1.000**	0.983**
EVI			1.000**	0.833**	0.909**	0.856**	0.859**	0.944**	0.816**	0.892**
GNDVI				1.000**	0.963**	0.946**	0.983**	0.924**	0.986**	0.972**
MSAVI					1.000**	0.987**	0.990**	0.988**	0.974**	0.998**
TGDVI						1.000**	0.985**	0.970**	0.974**	0.989**
OSAVI							1.000**	0.962**	0.995**	0.995**
DVI								1.000**	0.933**	0.980**
RVI									1.000**	0.983**
RDVI										1.000**

注：**表示显著性水平为 0.01；NDVI、EVI、GNDVI、MSAVI、TGNVI、OSAVI、DVI、RVI 和 RDVI 为不同的植被指数，参见第二章的植被指数计算。

3.3.2 建立模型

在 SPSS 中对 9 种植被指数进行 10 种曲线拟合，得到 180 个拟和方程。通过 F 检验、T 检验和决定系数 (R^2) 的大小的比较，最后得到两种数据下各波段的最适模型，结果见表 3—7。

表 3—7 各植被指数对应的最适模型

Tab.3-7 Optimum equation based on vegetation indices

数据	植被指数 (自变量 x)	模型	R^2
TERRA/MODIS	NDVI	$y = 174793x^{1.216}$	0.651
	EVI	$y = 341694x^{2.096}$	0.595
	GNDVI	$y = 387973x^{2.434}$	0.637
	MSAVI	$y = 353178x^{1.336}$	0.672
	TGDVI	$y = 17221.4 + 73276.9x$	0.520
	OSAVI	$y = 283158x^{1.288}$	0.663
	DVI	$y = 761337x^{1.473}$	0.654
	RVI	$y = -29804 + 41845.8x - 1945.5x^2$	0.674
	RDVI	$y = 360424x^{1.368}$	0.675
	NDVI	$y = 168820x^{1.181}$	0.648
AQUA/MODIS	EVI	$y = 6492.5\exp(4.626x)$	0.466
	GNDVI	$y = 305943x^{2.162}$	0.611
	MSAVI	$y = 301514x^{1.249}$	0.658
	TGDVI	$y = 78615.1x^{0.580}$	0.506
	OSAVI	$y = 262998x^{1.241}$	0.659
	DVI	$y = 577661x^{1.351}$	0.631
	RVI	$y = \exp(12.423 - 3.594/x)$	0.639
	RDVI	$y = 318256x^{1.300}$	0.660

注：以上方程均通过 0.01 水平下的统计检验。y 指产草量，单位为 $\text{kg}/0.25\text{km}^2$ ；NDVI、EVI、GNDVI、MSAVI、TGNVI、OSAVI、DVI、RVI 和 RDVI 为不同的植被指数，参见第二章的植被指数计算。

从表 3—7 中可以看出，对于 TERRA/MODIS 数据，9 种指数的最适模型的确定系数都达到了 0.52 以上。其中，有 7 个指数的确定系数在 0.6 以上，只有 EVI 和 TGDVI 的确定系数低于 0.6；确定系数最高的为 RDVI ($R^2=0.675$)，最低的为 TGDVI ($R^2=0.520$)，最大与最小之间相差 0.16， R^2 由高到低的顺序为：RDVI>RVI>MSAVI>OSAVI>DVI>NDVI>GNDVI>EVI>TGDVI；对于 AQUA/MODIS 数据，9 种指数对应最适模型的确定系数中，最高的为 RDVI ($R^2=0.660$)，最低的为 EVI ($R^2=0.466$)，最大与最小之间相差近 0.2， R^2 由高到低的顺序为：RDVI>OSAVI>MSAVI>NDVI>RVI>DVI>GNDVI>TGDVI>EVI。

整体上，基于 AQUA/MODIS 数据的植被指数与产草量的回归模型的确定系数要略低于基于 TERRA/MODIS 数据的植被指数与产草量的回归模型的确定系数，确定系数平均低 0.03。确定系数变化最大的是 EVI，变化最小的是 NDVI（见图 3—3）。植被指数变化由大到小的顺序为：EVI>RVI>GNDVI>DVI>RDVI>TGDVI>MSAVI>OSAVI>NDVI。

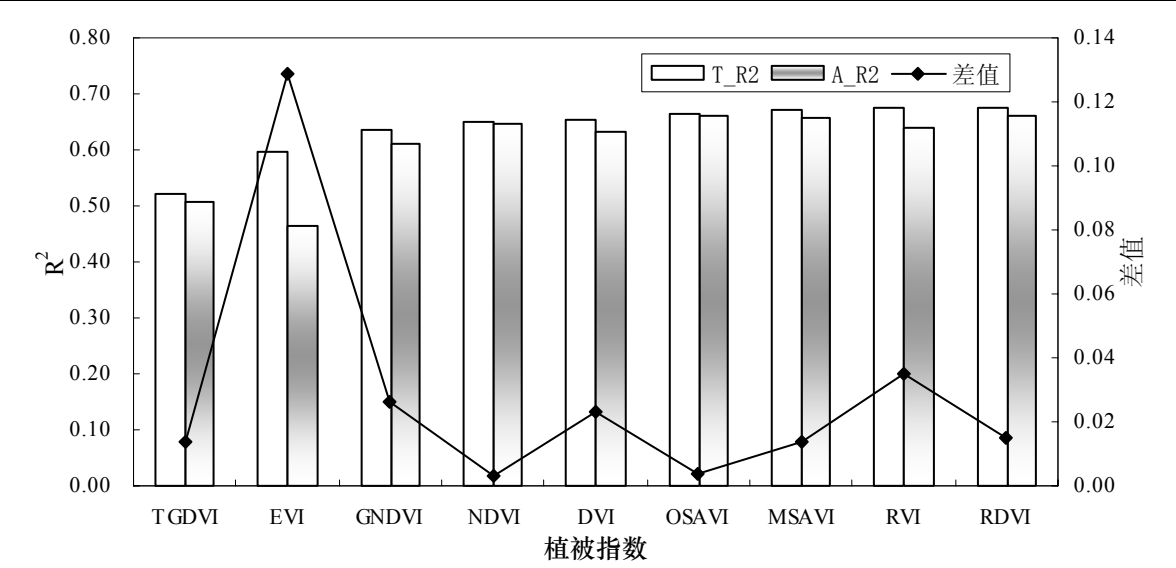


图 3—3 决定系数比较图。图中 TERRA_R2 指基于 TERRA/MODIS 数据算出的 R^2 值；AQUA_R2 指基于 AQUA/MODIS 数据算出的 R^2 值；差值等于 $TERRA_R^2 - AQUA_R^2$

Fig.3-3 The histogram of correlation coefficient. T_R means the correlation coefficient is calculated by TERRA/MODIS data. A_R means the correlation coefficient is calculated by AQUA/MODIS data. Difference equals to $TERRA_R^2$ minus $AQUA_R^2$

经过比较，基于 TERRA/MODIS 数据的 RDVI 与产草量的拟和关系最好，下面给出它的散点分布图：

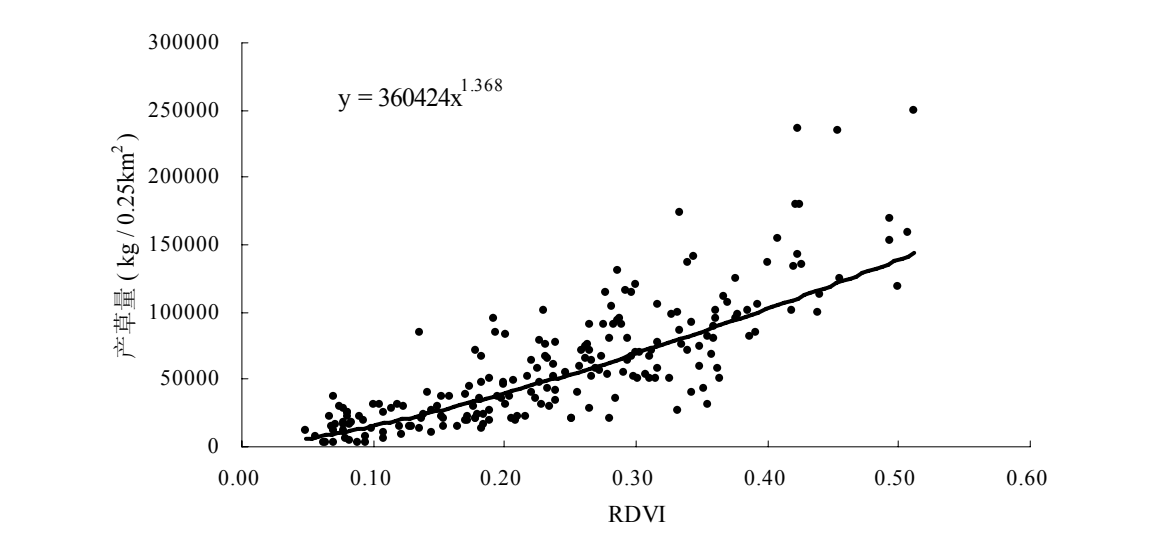


图 3—4 RDVI 与产量之间的散点图

Fig.3-4 Scatter plots of Production versus RDVI computed by surface reflectance product of MODIS

图 3—4 中的拟和曲线显示，随着植被覆盖度增加，拟和方程对产草量的估算逐渐偏低。

3.3.3 小结

从相关分析可以看出, TERRA/MODIS 上的 9 种植被指数与产量的相关关系较 AQUA/MODIS 上的 9 种植被指数与产量的相关关系高, 其中 RDVI 与产草量的相关性最高 ($r=0.833$)。

通过比较, 在基于两种数据源和 9 种植被指数建立的模型中, 由 TERRA/MODIS 数据计算的 RDVI 与产草量建立的模型拟和关系最好 ($R^2=0.675$), 但在高植被覆盖区, 会低估地面产草量。

3.4 植被指数模型 II

本节主要讨论利用 MODIS 数据的短波红外波段新构造的 12 种植被指数在草原产草量估算中的应用。由于新构造的植被指数与常用的植被指数基于不同的光谱特征, 新构造的指数也利用了植被对光谱的吸收特征, 但吸收特征是由叶细胞内水分含量对短波红外谱段的吸收引起的, 并且 MODIS 短波红外数据在生物量估算的应用研究很少, 因此有必要单独作为一节讨论。

Thenkabail 等 (1994) 将对植被水分敏感的 TM5、7 波段 (短波红外) 引入植被指数中, 通过不同的组合得到 6 种比值型植被指数。并通过大量的试验, 比较它们与常规由红波段、近红外波段组成的植被指数在估算大豆、玉米叶面积指数、湿生物量、干生物量、植被高度、最终产量等作物生长参数的有效性。试验结果表明, 加入短波红外的植被指数往往并不亚于常规植被指数, 尤其对玉米的改善明显 (Thenkabail P.S. et al, 1994)。N.Moleele 等 (2001) 通过 TM 影像数据, 结合野外调查, 来分析评价传统植被指数 (NDVI 等) 与基于短波红外的暗化植被指数 (Darkening indexes) 在半干旱地区生物量估算中的适用性, 结果表明: 只有暗化指数 (TM5/TM7、TM5+TM7、TM5-TM7 等) 与所有枝叶层中的每个层的生物量有较高的相关, 可用于估算草层和枝叶层的总绿色生物量 (Moleele N. et al, 2001)。研究也表明, 由于健康绿色植物吸收短波红外辐射, 具有较高的湿度值, 对于所有土壤背景, 绿色植被覆盖随湿度值的增大而增大, 对于干燥土壤尤其明显。因此, 选用穗帽变换的亮度分量或湿度来估计植物覆盖度比 GVI 更好。

短波红外的加入是否能够用于草原产草量的估算, 是否能够改善估算精度, 本节将进行详细的讨论。

3.4.1 相关分析

从表 3-8 和表 3-9 中的结果可以看出, 由 TERRA/MODIS 得到的新指数与产草量的相关关系较 AQUA/MODIS 得到的新指数与产草量的相关关系高。除由 AQUA/MODIS 计算的 VI7、VI4 和 VI9 这三种指数与产草量的关系略低, 其它植被指数与产草量之间的相关关系都达到了强相关, 且均达极显著, 因此可作为遥感指标与产草量建立估算模型。

不同指数与地面产草量的相关性存在一定的差别。除 VI1 之外其它指数均与地面产量都呈正相关。对于 TERRA/MODIS 数据, 各指数与产量的相关关系由高到低的顺序为: VI12>VI10>VI11>VI2>VI3>VI8>VI7>VI5>VI1>VI6>VI9>VI4, 其中, VI12、VI10、VI11、VI2 和 VI3 与产量的相关系数在 0.8 以上, VI8、VI7、VI5、VI1、VI6、VI9 和 VI4 与产量的相关系数

在 0.7~0.8 之间，但都较单波段与产量的相关性好；对于 AQUA/MODIS 数据，各指数与产量的相关关系由高到低的顺序为：VI10>VI12>VI3>VI11>VI8>VI1>VI8>VI5>VI6>VI7>VI4>VI9，其中，仅 VI10 与产量的相关系数在 0.8 以上，VI12、VI3、VI11、VI8、VI1、VI8 和 VI5 与产量的相关系数在 0.7~0.8 之间，VI7、VI4 和 VI9 与产量的相关关系在 0.6~0.7 之间。

各波段之间相关性较高，并且均达极显著。除 VI9 与其它指数相关关系相对较低外，其它各指数之间的相关关系都非常高，绝大部分达到了 0.9 以上。

表格 3—8 基于 TERRA/MODIS 数据的相关分析结果
Tab.3-8 Results of correlation based on TERRA/MODIS data

相关系数	产草量	VI 1	VI 2	VI 3	VI 4	VI 5	VI 6	VI 7	VI 8	VI 9	VI 10	VI 11	VI 12
产草量	1.000**	-0.786**	0.824**	0.817**	0.742**	0.796**	0.777**	0.797**	0.798**	0.769**	0.828**	0.828**	0.831**
VI 1		1.000**	-0.960**	-0.939**	-0.835**	-0.924**	-0.891**	-0.959**	-0.905**	-0.846**	-0.968**	-0.940**	-0.958**
VI 2			1.000**	0.991**	0.921**	0.985**	0.966**	0.975**	0.978**	0.915**	0.991**	0.982**	0.987**
VI 3				1.000**	0.955**	0.988**	0.982**	0.942**	0.984**	0.877**	0.981**	0.979**	0.980**
VI 4					1.000**	0.963**	0.986**	0.849**	0.961**	0.765**	0.886**	0.915**	0.893**
VI 5						1.000**	0.993**	0.954**	0.992**	0.883**	0.959**	0.966**	0.958**
VI 6							1.000**	0.916**	0.987**	0.840**	0.935**	0.951**	0.937**
VI 7								1.000**	0.941**	0.936**	0.965**	0.946**	0.955**
VI 8									1.000**	0.899**	0.955**	0.964**	0.955**
VI 9										1.000**	0.911**	0.892**	0.900**
VI 10											1.000**	0.978**	0.993**
VI 11												1.000**	0.989**
VI 12													1.000**

注：**表示显著性水平为 0.01；VI 1~VI 12 指新构造的 12 种植被指数。

表格 3—9 基于 AQUA/M 数据的相关分析结果
Tab.3-9 Results of correlation based on AQUA/MODIS data

相关系数	产草量	VI 1	VI 2	VI 3	VI 4	VI 5	VI 6	VI 7	VI 8	VI 9	VI 10	VI 11	VI 12
产草量	1.000**	-0.751**	0.778**	0.772**	0.652**	0.738**	0.717**	0.664**	0.749**	0.617**	0.804**	0.762**	0.794**
VI 1		1.000**	-0.959**	-0.938**	-0.798**	-0.912**	-0.889**	-0.837**	-0.891**	-0.711**	-0.969**	-0.923**	-0.953**
VI 2			1.000**	0.964**	0.847**	0.982**	0.951**	0.894**	0.973**	0.806**	0.980**	0.956**	0.968**
VI 3				1.000**	0.938**	0.949**	0.973**	0.763**	0.954**	0.661**	0.972**	0.981**	0.982**
VI 4					1.000**	0.878**	0.957**	0.594**	0.892**	0.479**	0.837**	0.909**	0.874**
VI 5						1.000**	0.977**	0.884**	0.989**	0.794**	0.933**	0.934**	0.930**
VI 6							1.000**	0.780**	0.976**	0.676**	0.918**	0.951**	0.933**
VI 7								1.000**	0.857**	0.957**	0.829**	0.767**	0.794**
VI 8									1.000**	0.787**	0.932**	0.940**	0.932**
VI 9										1.000**	0.740**	0.680**	0.702**
VI 10											1.000**	0.965**	0.989**
VI 11												1.000**	0.984**
VI 12													1.000**

注：**表示显著性水平为 0.01；VI 1~VI 12 指新构造的 12 种植被指数。

3.4.2 建立模型

在 SPSS 中对 12 被指数进行 10 种曲线拟合, 得到 240 个拟和方程。通过 F 检验、T 检验和决定系数 (R^2) 的大小的比较, 最后得到两种数据下各波段的最适模型, 结果见表 3—10。

表 3—10 新构造的植被指数对应的最适模型

Tab.3-10 Optimum equation based on new vegetation indices

数据	植被指数 (自变量 x)	模型	R^2
TERRA/MODIS	VI 1	$y = 11919.5 + 5332.8/x$	0.624
	VI 2	$y = -21114 + 88803.2 x$	0.702
	VI 3	$y = -69662 + 184507x$	0.687
	VI 4	$y = -88818 + 148420x$	0.560
	VI 5	$y = -22102 + 56723.2x$	0.663
	VI 6	$y = -55622 + 197439x$	0.627
	VI 7	$y = -108753 + 121681x$	0.649
	VI 8	$y = 31125.1 + 292759x + 1426527x^2 - 3.E+06x^3$	0.620
	VI 9	$y = 10408 \exp(19.8966x)$	0.573
	VI 10	$y = -81.922 + 151443x$	0.709
	VI 11	$y = -43255 + 162385x$	0.713
	VI 12	$y = -29495 + 203893x$	0.708
AQUA/MODIS	VI 1	$y = -46331 - 54264 \ln x$	0.572
	VI 2	$y = 76857.7 - 88323 \ln x$	0.605
	VI 3	$y = -61095 + 169961x$	0.620
	VI 4	$y = -72426 + 128929x$	0.489
	VI 5	$y = -118921 + 234062x - 90942x^2 + 13125.9x^3$	0.581
	VI 6	$y = -48227 + 183447x$	0.563
	VI 7	$y = \exp(13.333 - 3.408/x)$	0.403
	VI 8	$y = 38463 + 352667x$	0.530
	VI 9	$y = 19098.9 \exp(12.681x)$	0.358
	VI 10	$y = 3661.2 + 140767x$	0.643
	VI 11	$y = -30518 + 139951x$	0.590
	VI 12	$y = -23628 + 187219x$	0.632

注: 以上方程均通过 0.01 水平下的统计检验。y 指产草量, 单位为 $\text{kg}/0.25\text{km}^2$; VI 1~VI 12 指新构造的 12 种植被指数。

从表 3—10 中可以看出, 对于 TERRA/MODIS 数据, 12 种新构造的指数对应最适模型的决定系数都达到了 0.56 以上, 最高的为 VI11 ($R^2=0.713$), 最低的为 VI4 ($R^2=0.560$), 最大与最小之间相差 0.15。其中 R^2 值在 0.7 以上的为 VI2、VI10、VI11 和 VI12 四个指数, R^2 值在 0.6—0.7 之间的为 VI 1、VI 3、VI 5、VI 6、VI 7 和 VI 8 六个指数, VI 4 和 VI 9 的 R^2 值低于 0.6。 R^2 由高到低的顺序为: VI 11>VI 10>VI 12>VI 2>VI 3>VI 5>VI 7>VI 6>VI 1>VI 8>VI 9>VI 4。

对于 AQUA/MODIS 数据, 12 种新构造的指数的最适模型的决定系数分布在 0.35~0.65 之间, 最高的为 VI10 ($R^2=0.643$), 最低的为 VI9 ($R^2=0.358$), 最大与最小之间相差 0.29。其中 R^2 值在 0.6 以上的为 VI2、VI3、VI10 和 VI12 四个指数, R^2 值在 0.5—0.6 之间的为 VI 1、VI 5、VI 6、VI 8 和 VI 11 五个指数, VI 4、VI7 和 VI 9 的 R^2 值低于 0.5。 R^2 由高到低的顺序为: VI 10>VI

12> VI 3> VI 2> VI 11> VI 5> VI 1> VI 6> VI 8> VI 4> VI 7> VI 9;

基于 AQUA/MODIS 数据的植被指数与产量的回归模型的决定系数整体上要低于基于 TERRA/MODIS 数据的植被指数与产量的回归模型，决定系数平均低 0.11。变化最大的是 VI7，变化最小的是 VI1（见图 3—5）。新构造的植被指数的决定系数的变化由大到小的顺序为：VI7>VI9>VI11>VI5>VI2>VI8>VI12>VI4>VI3>VI10>VI6>VI1。

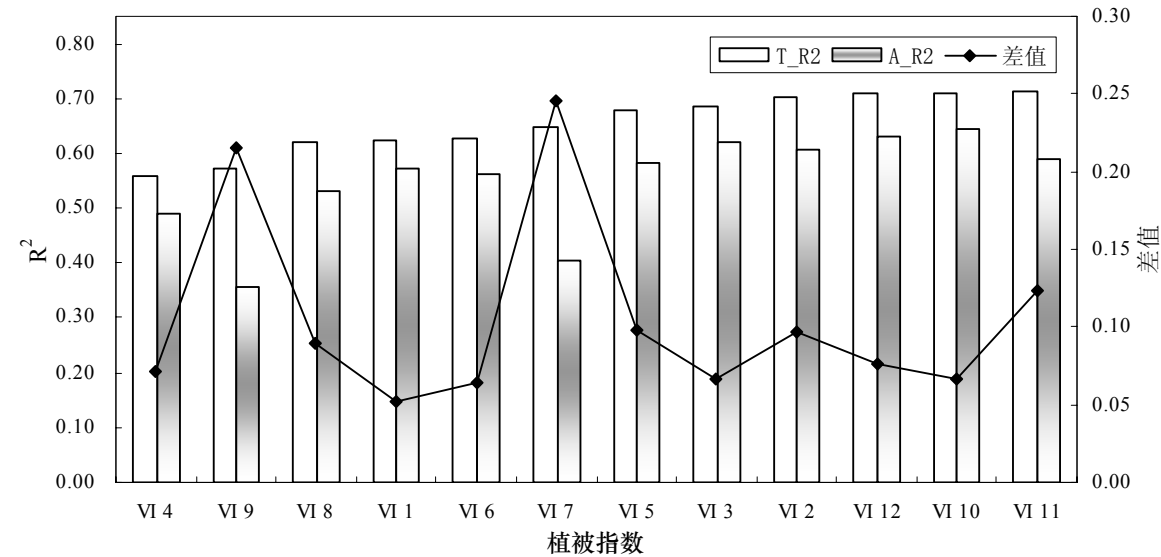


图 3—5 决定系数比较图。图中 T_R² 指基于 TERRA/MODIS 数据算出的 R² 值；A_R² 指基于 AQUA/MODIS 数据算出的 R² 值；差值等于 T_R²-A_R²；VI1~VI12 代表新构造的 12 种植被指数。

Fig.3-5 The histogram of correlation coefficient. T_R means the correlation coefficient is calculated by TERRA/MODIS data. A_R means the correlation coefficient is calculated by AQUA/MODIS data. Difference equals to T_R² minus A_R². VI1~VI12 means twelve kinds of new vegetation index contained shortwave infrared band

对于两种数据，基于 TERRA/MODIS 数据的 VI11 与产草量的拟和关系最好，下面给出它的散点分布图：

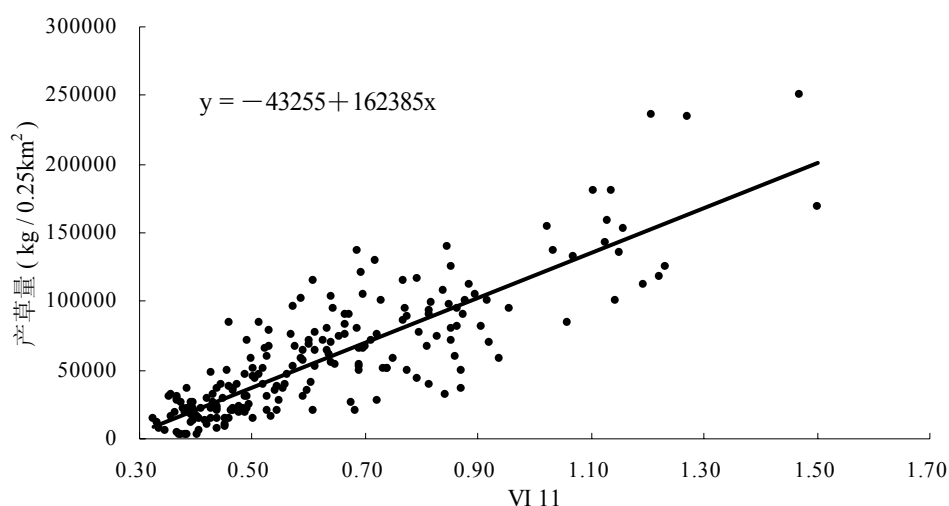


图 3—6 VI11 与产草量之间的散点图，VI11 表示新构造的植被指数

Fig.3-6 Scatter plots of production versus VI11 computed by surface reflectance product of MODIS. VI11 means the new vegetation index contained shortwave infrared band.

3.4.3 小结

从相关分析可以看出，TERRA/MODIS 上的 12 种新构造的植被指数与产量的相关关系较 AQUA/MODIS 上的 12 种新构造的植被指数与产量的相关关系高，其中 VI12 与产草量的相关性最高 ($r=0.831$)。

通过比较，在基于新构建的植被指数建立的模型中，由 TERRA/MODIS 反射率数据计算得到的 VI11 为最好的估算指标 ($R^2=0.713$)。

第四章 模型评价

模型评价的目的在于，从众多模型中遴选出适合该区域的估算方法，并对该模型在空间中的表现给出定量的评价，确保模型质量，方便模型的应用。

本文的模型评价主要包括三部分，第一步：统计评价，根据决定系数的大小 (R^2) 给出初步的评价；第二步：敏感性分析，构造敏感性函数，对遥感指标对产草量变化的敏感性进行定量分析；第三步：模型验证，对模型在空间上的实际表现进行量化。

4.1 统计评价

根据决定系数的大小，从统计的角度对拟合方程进行初步评价。决定系数是一个回归方程与样本观测值拟合优度的指标， R^2 值越接近 1，拟合优度就越好，说明模型中给出的 X 与 Y 的信息得到了充分的利用。

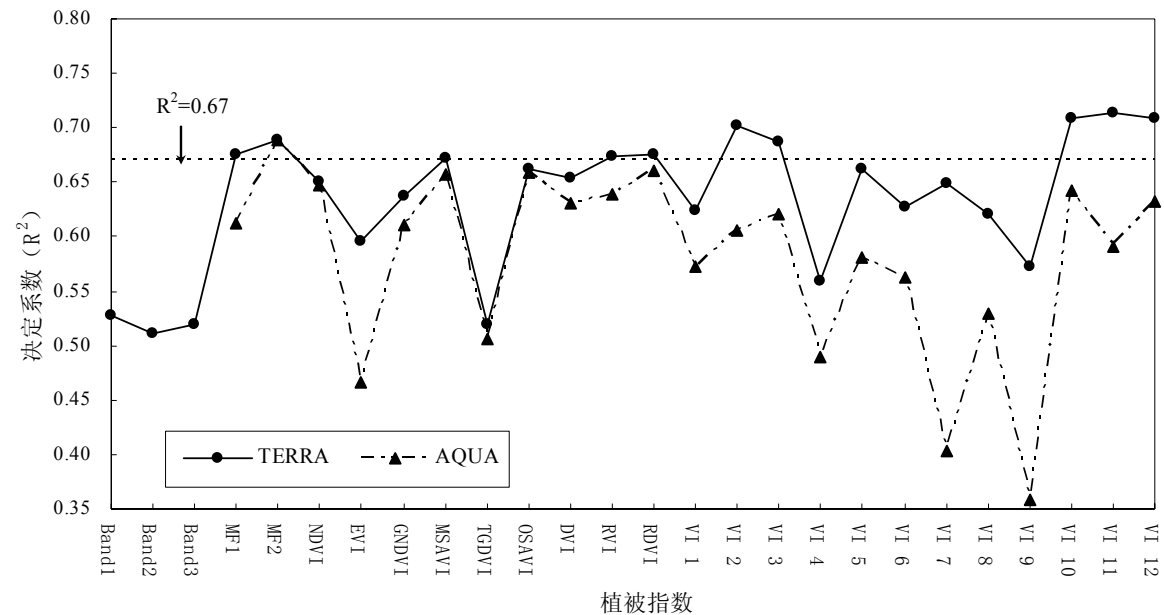


图 4—1 决定系数比较图。图中 TERR 指基于 TERRA/MODIS 数据算出的 R^2 值；AQUA 指基于 AQUA/MODIS 数据算出的 R^2 值；MF1 表示单卫星多波段模型的 R^2 值，MF2 表示基于双星的多波段模型的 R^2 值。其它意思同前。

Fig.4-1 The determination coefficient comparison. TERRA means the determination coefficient is calculated by TERRA/MODIS data. AQUA means the determination coefficient is calculated by AQUA/MODIS data. MF1 means the determination coefficient of multiband based on single satellite. MF2 means the determination coefficient of multiband based on binaries satellite. The meaning of other symbols is same with the former.

总体上，植被指数模型 II 相比植被指数模型 I 在两颗星之间的变化比较大（见图 4—1）。Yang

W.et al(2006)研究表明：对于 TERRA 星和 AQUA 星上的 MODIS 数据来说，8 天合成的反射率产品均值在大尺度上无显著差别（Yang W. et al,2006），但只是对红波段和近红外波段而言，其它波段并未比较，所以可能是由于新加入的短波红外波段的反射率在上午和下午差别较大造成整体差异较大。

通过决定系数的大小（见图 4—1），并考虑模型的计算量的大小，包含波段越多，计算量越大，但如果新加入一个波段对 R^2 值的贡献小的基本可以忽略，则舍弃该模型。综合考虑之后，选择 RDVI、VI2、VI3、VI10、VI11 和 VI12 共 6 种植被指数模型（见表 4—1）。下面对这几种模型进一步评价。

表 4—1 最适模型

Tab.4-11 Optimum equation based on vegetation indices			
数据	植被指数(自变量 x)	模型	决定系数
TERRA/MODIS	VI 2	$y = -21114 + 88803.2x$	0.702
	VI 3	$y = -69662 + 184507x$	0.687
	VI 10	$y = -81.922 + 151443x$	0.709
	VI 11	$y = -43255 + 162385x$	0.713
	VI 12	$y = -29495 + 203893x$	0.708
	RDVI	$y = 360424x^{1.368}$	0.675

注：以上方程均通过 0.01 水平下的统计检验。y 指产草量，单位为 kg/0.25km²；VI2, VI3, VI10, VI11, VI12, RDVI 指植被指数，具体参见第二章的植被指数计算。

4.2 敏感性分析

大量的植被指数被用于估算植被生物物理学参数。传统上通过回归统计的方法对指数的表现进行评价，例如决定系数和均方根误差。但是，这些统计方法不足以对植被指数与生物学参数详细的量化分析，因为植被指数的敏感性通常是生物学参数的函数，而不是一个常数。为了更好的分析这种关系，需要一个敏感性函数对植被指数与生物学参数间的敏感性进行度量。

每一种指数都有其优点和缺点。一个理想的植被指数应该是对被估算量高度敏感而对冠层背景和大气影响引起的噪音相对不敏感。通常， R^2 、MSE 和 RMSE 被用于对指数的敏感性分析。这些统计量通过单个值概括了某个植被指数与产量的全部关系。但事实是，用单个值来量化这种关系过于简单，是不合适的，因为一个植被指数对生物学参数的敏感性是随植被密度变化的。因此构建敏感性分析函数对进一步理解植被指数与生物学参数之间的关系是非常有意义的。Baret 和 Guyot（1991）基于模拟数据构建了一个 REN（relative equivalent noise）函数用于评价植被指数对 LAI 和 APAR 的敏感性（Baret F. & Guyot G,1991）。Huete et al（1994）使用 VEN（vegetation equivalent noise）函数来表示植被指数中的噪音（Huete A.et al,1994）。REN 和 VEN 提供了敏感性/噪音的度量，但是对求导之后的随机误差并没有考虑进敏感性/噪音函数中。

Lei Ji 和 Albert J(2007)在前人研究的基础上对敏感性函数作了改进，提出了一个新的敏感性分析函数，实现了：（a）在整个生物物理学参数的变化范围内给出敏感性的变化情况；（b）在敏感性分析中考虑回归方程的估算误差；（c）对敏感性进行统计检验。（Lei Ji&Albert J.P.,2007）

本文亦选用 Lei Ji 和 Albert J 提出的敏感性分析函数对所建模型进行敏感性分析。

4.2.1 敏感性函数的数学推导

假定利用地面产量数据和植被指数建立回归方程，产量作为自变量（x），植被指数作为因变量（y），那么拟合方程可以表示为：

$$\hat{y} = f(x) \quad (1)$$

回归方程可以是线性、曲线或非线性。因为 $\hat{y}$ 值是被估算出来的，必然有估算误差，可以用 $\hat{y}$ 的标准误差来度量，记做 $\sigma_{\hat{y}}$ 。在线性回归和曲线模型中， $\sigma_{\hat{y}}$ 的计算方法为：

$$\sigma_{\hat{y}} = \sqrt{\sigma^2 X_i' (X'X)^{-1} X_i} \quad (2)$$

式中： σ^2 为均方根误差（MSE），X 是自变量矩阵， X_i 是矩阵 X 的第 i 行。在非线性回归中， $\hat{y}_i$ 的标准误差通过下面的公式近似计算：

$$\sigma_{\hat{y}_i} = \sqrt{\sigma^2 F_i' (F'F)^{-1} F_i} \quad (3)$$

式中：F 是近似最小二乘估计的派生矩阵， F_i 是矩阵 F 的第 i 行。对矩阵 X 和 F 的更详细的定义可参考相关的统计书。

回归方程（1）的一阶导数可以表示为：

$$\hat{y}' = f'(x) = \frac{d(\hat{y})}{d(x)} \quad (4)$$

式中： $\hat{y}'$ 反应了 $\hat{y}$ 相对于 x 的变化率，即给定 x 值变化一个单位引起 $\hat{y}$ 变化多少个单位。需要注意的是 $\hat{y}'$ 度量了 x 对 $\hat{y}$ 的敏感性，而不是 y。因此利用 $\hat{y}'$ 来指示敏感性是不够的，除非 $\hat{y}'$ 的变异，或者是 $\hat{y}'$ 的标准误差（记做 $\sigma_{\hat{y}'}$ ）在敏感性分析中给与考虑。在方程（1）中，自变量 x 假定是可控制的， $\hat{y}'$ 的标准误差等于 $\hat{y}$ 的标准误差，即 $\sigma_{\hat{y}'} = \sigma_{\hat{y}}$ 。最后，敏感性函数可以定义为：

$$S = \frac{\hat{y}'}{\sigma_{\hat{y}}} = \frac{d\hat{y}/dx}{\sigma_{\hat{y}}} \quad (5)$$

S 值越大表示 x 对 y 的敏感性越高，S 值越小则表示敏感性越低。

$\hat{y}'$ 的显著性可以通过 T 统计量或 Z 统计量来检验。对于第 i 个观测值，零假设是 $H_0: \hat{y}' = 0$ ，备择假设是 $H_1: \hat{y}' \neq 0$ 。构造 $\hat{y}'$ 的双尾 T 检验统计量：

$$t = \frac{\hat{y}'_i}{\sigma_{\hat{y}_i}} \quad (6)$$

t 检验的结果通过相应的 p 值来判断，或者拒绝零假设 ($p < \alpha$)，或者接受原假设。注意到，这个公式与敏感性函数是一样的，即 S 值就等于 t 值。

4.2.2 敏感性分析

根据敏感性函数分析的需要，以植被指数作为因变量 y，以产草量作为自变量 x，所以重新拟合曲线获得参数。重新拟合的结果见表 4—2：

表 4—2 以植被指数作为因变量的拟合方程

Tab.4-2 Fitted equation based on production against vegetation index as dependent variable			
数据	植被指数（因变量 y）	模型	R ²
TERRA/MODIS	VI 2	$y = 0.4377 + 0.1977x$	0.702
	VI 3	$y = 0.4788 + 0.0930x$	0.687
	VI 10	$y = 0.1152 + 0.1170x$	0.709
	VI 11	$y = 0.3719 + 0.1097x$	0.713
	VI 12	$y = 0.2299 + 0.0869x$	0.708
	RDVI	$y = 0.1624x^{0.4916}$	0.675

注：以上方程均通过 0.01 水平下的统计检验。x 指产草量，单位为 t/ha；VI2, VI3, VI10, VI11, VI12, RDVI 指植被指数，具体参见第二章的植被指数计算。

对表 4—2 中的拟合方程求导：

$$VI\ 2: \frac{d\hat{y}}{dx} = 0.1977$$

$$VI\ 3: \frac{d\hat{y}}{dx} = 0.0930$$

$$VI\ 10: \frac{d\hat{y}}{dx} = 0.1170$$

$$VI\ 11: \frac{d\hat{y}}{dx} = 0.1097$$

$$VI\ 12: \frac{d\hat{y}}{dx} = 0.0869$$

$$RDVI: \frac{d\hat{y}}{dx} = 0.0800x^{-0.5084}$$

$\sigma_y^{\wedge}$ 通过 SPSS 软件计算得到，然后通过敏感性函数 S 即方程（5）计算得到敏感性曲线。

由于 VI2,VI3,VI10,VI11,VI12 与产草量的最适模型均为一元线性函数，敏感性曲线相似，因此先对这五种新构造的植被指数的敏感性进行分析。

从图 4—2 可以看出，VI2,VI3,VI10,VI11,VI12 的敏感性在草原产草量小于 2.2t/ha 时呈迅速增加的趋势；当草原产草量大于 2.2t/ha 时，敏感性迅速降低。在 0.05 水平下，双尾 T 检验的临界值为 1.96，t 检验结果显示，VI3、VI10、VI11 和 VI12 对产量变化的敏感性一直显著，在草原产草量高于 9.5 t/ha 时，VI2 对产草量变化的敏感性开始变的不显著。五种指数中，VI11 对产草量变化的敏感性相对最高。

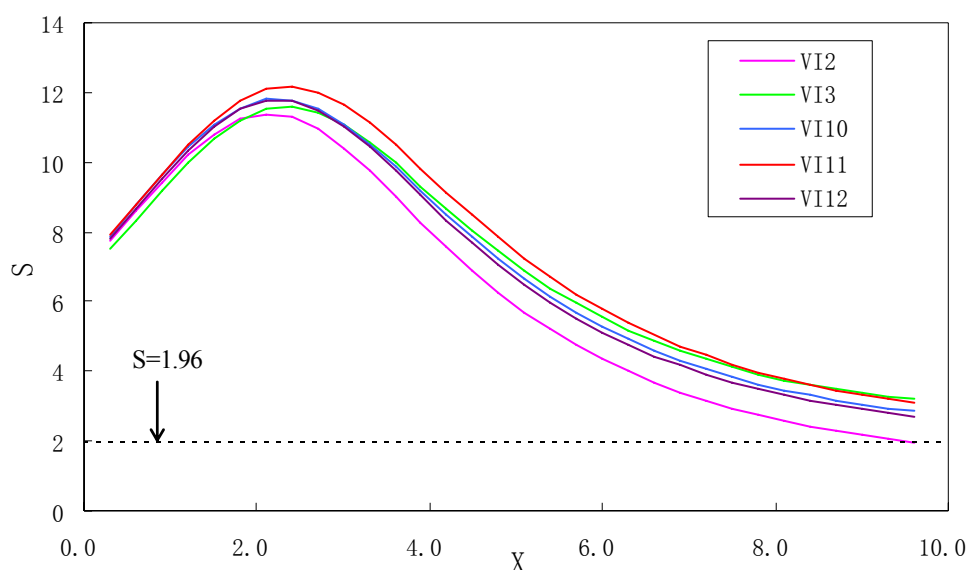


图 4-2 五种植被指数的敏感性图; 当 $s > 1.96$ 时, 植被指数对产量变化的敏感性显著; X 表示产草量, 单位为 t/hm^2 ; VI2, VI3, VI10, VI11, VI12 指 5 种新构造的包含短波红外的植被指数, 有 TERRA/MODIS 反射率数据计算得到.

Fig.4-2 Sensitivity functions (s) for the five vegetation indices. The sensitivity of a vegetation index to production (denoted as x) is significant when $s > 1.96$. VI2, VI3, VI10, VI11, VI12 mean the five new vegetation indices contained shortwave infrared band and calculated based on TERRA/MODIS reflectance data.

RDVI 与产草量的最适模型为幂函数, 并且在指数的构造上与 VI2、VI3、VI10、VI11 和 VI12 有明显的差别, 下面进一步对 RDVI 和 VI11 的敏感性进行分析。

图 4-3 显示, 在两种指数中, RDVI 的敏感性随草原单位面积产量的增加呈指数递减趋势。VI11 的敏感性在草原产草量小于 $2.2t/ha$ 时呈逐渐增加的趋势, 当草原产草量大于 $2.2t/ha$ 时, 呈逐渐降低的趋势。

当草原产草量低于 $1.8t/ha$ 时, GNDVI 有较高的敏感性, VI11 的敏感性低于 GNDVI 的敏感性, 表明植被覆盖低的时候 GNDVI 对产量变化非常敏感; 当草原产草量高于 $1.8t/ha$ 时, VI11 有较高的敏感性, GNDVI 的敏感性低于 VI11 的敏感性, 表明植被覆盖高的时候 GNDVI 对产量变化比较敏感。

在 0.05 水平下, 双尾 T 检验的临界值为 1.96。t 检验结果显示, 当草原产草量低于 $5.8 t/ha$ 时, GNDVI 对产量变化的敏感性显著, 当草原产草量高于 $5.8 t/ha$ 时则变的不显著。VI11 对产量变化的敏感性一直显著。

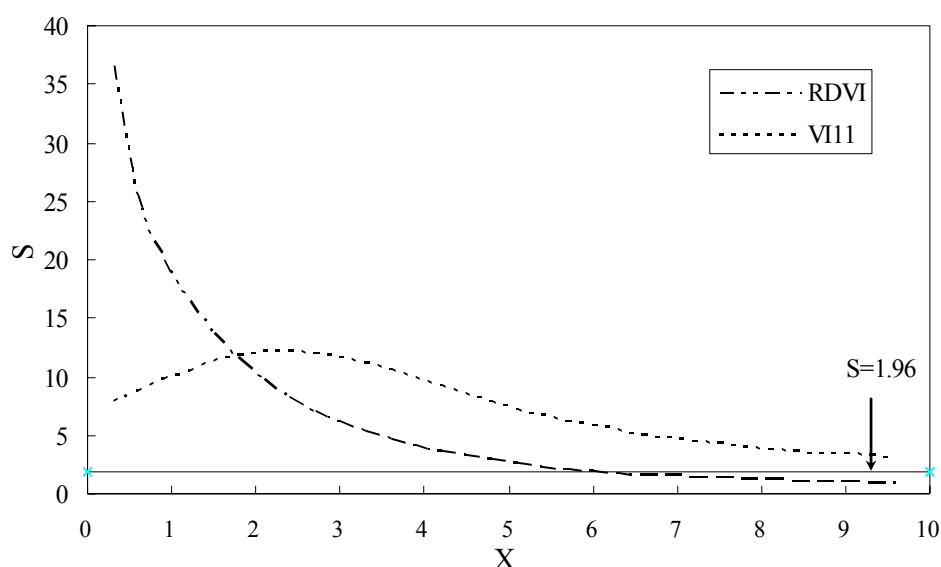


图 4—3 两种植被指数的敏感性图：当 $s > 1.96$ 时，植被指数对产量变化的敏感性显著。RDVI 和 VI11 表示植被指数，由 TERRA/MODIS 反射率数据计算得到

Fig.4-3 Sensitivity functions (s) for the two vegetation indices. The sensitivity of a vegetation index to production (denoted as x) is significant when $s > 1.96$. RDVI and VI11 mean the two vegetation indices calculated based on TERRA/MODIS reflectance data.

综上所述，RDVI 和 VI11 的敏感性在不同产量区域敏感性差异显著，下面结合精度验证进一步进行分析。

4.3 模型验证

由于两种指数的敏感性随产量的变化而变化，因此在不同产量区哪个更适合，还需要利用地面样方对模型进一步验证，从而决定适合内蒙古草原地面产草量的估算方法。

本文利用随机预留的验证数据集对模型进行验证。相对均方根误差和绝对均方根误差被用于验证结果的评价。相对均方根误差 RRMSE (Relative Root Mean Squared Error) 和绝对均方根误差 RMSE (Root Mean Squared Error) 的计算公式如下：

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum \left[\frac{(Y_i' - Y_i)}{Y_i} \right]^2}{N}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i' - Y_i)^2}{N}}$$

式中 Y_i' 是模型测算的产量， Y_i 是实际产量， N 是样点数。模型的实际估算精度有 $1 - RRMSE$ 得到。对于理想的拟合， $Y_i' = Y_i$ ，RRMSE 和 RMSE=0，因此两者值的范围在 $0 \sim \infty$ ，值越小说明拟合效果越好。

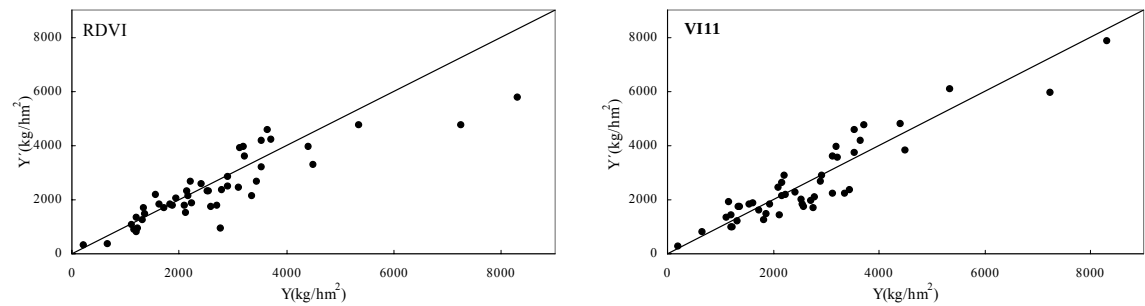


图 4-4 实测值与预测值的散点图

Fig.4-4 Scatter plots of actual value versus predicted value

检验结果表明（见表 4-3），基于 RDVI 的模型的 RRMSE 为 0.24，RMSE 为 774.4 kg/hm²，而基于 VI11 的模型的 RRMSE 为 0.23，RMSE 为 600.2 kg/hm²。基于 VI11 的回归模型总体好于基于 RDVI 的模型。

根据之前的敏感性分析可以看出，当产草量<1800 kg/hm²），RDVI 的敏感性明显的高于 VI11，之后随着产量的增加敏感性迅速降低，而 VI11 表现出较好的敏感性。从图 4-4 中也可以观察到，在产量逐渐增加的时候基于 RDVI 的模型的估算值开始偏低，说明 RDVI 出现饱和问题，而 VI11 的对产量变化的敏感性依然显著，在高产区的估算值未出现偏低的趋势。

以两者敏感性的相对大小为分界点，即以 1800 kg/hm² 为分界点，分低产区和高产区进行验证，产量低于 1800 kg/hm² 的区域为低产区，产量高于 1800 kg/hm² 的区域为高产区。验证结果见表 4-3，在低产区，RDVI-Production 模型的 RRMSE 为 0.25，RMSE 为 264.7 kg/hm²，略低于 VI11-Production 模型；在高产区，VI11-Production 模型的 RRMSE 为 0.24，RMSE 为 684.5 kg/hm²，略低于 RDVI-Production 模型。由于低产区产草量的基数小，高产区产草量基数大，所以尽管 RRMSE 值相差不大，但 RMSE 值相差很大，这也说明，仅利用单个的统计指标对模型作出评价是不合理的。

表 4-3 验证结果

Tab.4-3 Results of test

数据	指数	低产区		高产区		全部	
		RRMSE	RMSE	RRMSE	RMSE	RRMSE	RMSE
TERRA/MODIS	RDVI	0.25	264.7	0.23	850.2	0.24	774.4
	VI11	0.26	335.8	0.22	684.5	0.23	600.2

注：表中低产区指产草量低于 1800 kg/hm² 的区域，高产区指产草量高于 1800 kg/hm² 的区域。RMSE 的单位为 kg/hm²

4.4 小结

由此可以判断出，RDVI 在草地植被覆盖度低时，敏感性高，有较好的估算精度。而 VI11 在草地植被覆盖度高时，敏感性高，有较好的估算精度，并且未出现饱和现象。基于以上分析，利用 TERRA/MODIS 数据，综合两种指数在不同产量区的优势协同估算内蒙古草原的地面鲜草产量，即以产草量等于 1800 kg/hm² 为界限，可以算出这时的 RDVI 值为 0.22。最终估算方法为：

$$Y = \begin{cases} 360424 X_1^{1.368}, & RDVI \leq 0.22 \\ -43255 + 162385 X_2, & RDVI > 0.22 \end{cases}$$

式中， $X_1=RDVI$ ， $RDVI$ 的值的范围在 0~1 之间； $X_2=VI11$ ，在有植被的地方 $VI11$ 的值大于 0，植被覆盖度越高，值越大，且会超过 1； Y 为草原地面产草量，单位为 $kg/0.25km^2$ 。

第五章 模型应用

对于内蒙古草原，7 月底至 8 月初地面产草量基本达到了一年的最大值，因此选取 2006 年 7 月 28 日—8 月 5 日的 TERRA/MODIS 反射率数据对内蒙古草原地面产草量进行估算。

两种植被指数的计算结果见图 5—1。两种植被指数值的大小不同，但从颜色上看高低值区域有很好的对应关系，从西至东，植被指数值逐渐增加。

将估算方法在内蒙古进行应用。鲜草产量估算结果见图 5—2，折合成干重得到图 5—3。其中干鲜比折算系数来自《中国草地资源》。利用 1：400 万的地区界限和 1：100 万的草地界限统计得到内蒙古各地区草原产草量情况（见表 5—1）和各草原类型产草量情况（见表 5—2）。

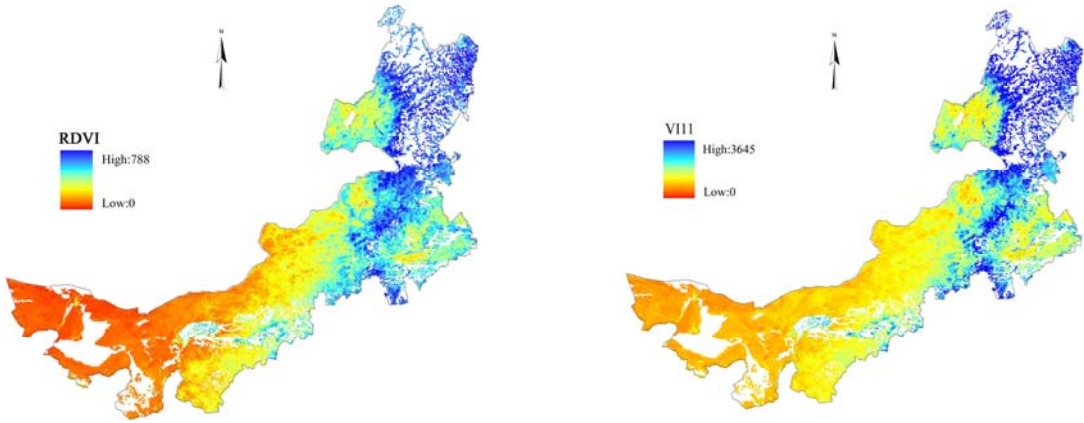


图 5-1. 植被指数空间分布图

Fig. 5-1 Spatial distribution of vegetation index.

空间上，产量高低区域分布层次明显，从西到东，产量逐渐增加。产量最低的区域出现在阿拉善盟荒漠化草原，产量最高的区域位于呼伦贝尔草原东北部的山地草甸，大致沿大兴安岭东北向西南延伸（见图 5—2 和图 5—3），内蒙古大部分地区草原的干草产量都低于 500kg/hm²。

表 5—1 2006 年内蒙古各地区产草量情况

Tab.5-1 Grassland production of Inner Mongolia in 2006

地区	产草量 (t•鲜草)	单产 (kg•鲜草/hm ²)	产草量 (t•干草)	单产 (kg•干草/hm ²)
呼和浩特市	2211004	2853.6	708097	913.9
包头市	1948630	918.0	650815	306.6
乌海市	83214	558.2	31236	209.5
赤峰市	22597327	4272.0	7148761	1351.5
通辽市	14229616	3309.9	4417759	1027.6
鄂尔多斯市	7745097	1187.8	2599178	398.6
呼伦贝尔市	55899063	4688.5	16586506	1391.2
巴彦淖尔市	2973335	564.1	1053854	199.9
兴安盟	17159935	5472.2	5219935	1664.6
锡林郭勒盟	50599732	2577.8	16054195	817.9
乌兰察布盟	5251685	1577.6	1736623	521.7
阿拉善盟	4336603	259.6	1527766	91.5
总计	185035241	2337.8	57734725	729.4

表 5—2 2006 年内蒙古各草地类型产草量情况

Tab.5-2 Grassland production of Inner Mongolia in 2006

草地类型	产草量 (t•鲜草)	单产 (kg•鲜草/hm ²)	产草量 (t•干草)	单产 (kg•干草/hm ²)
低地草甸类	50684883	4428.2	14351627	1253.9
改良草地	358248	2205.3	110044	677.4
高寒草甸草原类	742101	2690.5	228776	829.4
高寒草原类	7740	225.5	2143	62.4
暖性草丛类	244991	2687.8	75548	828.8
暖性灌草丛类	321687	2989.0	99417	923.7
热性草丛类	9403	3450.6	2918	1070.8
热性灌草丛类	634997	6216.3	197544	1933.9
山地草甸类	6274041	7079.7	1782962	2011.9
温性草甸草原类	45778328	5191.8	14215428	1612.2
温性草原化荒漠类	2856462	562.0	1090026	214.5
温性草原类	62894532	2426.2	20623886	795.6
温性荒漠草原类	8508088	914.8	3043441	327.2
温性荒漠类	4385436	266.9	1583781	96.4
沼泽类	1334304	2732.8	327184	670.1
总计	185035241	2337.8	57734725	729.4

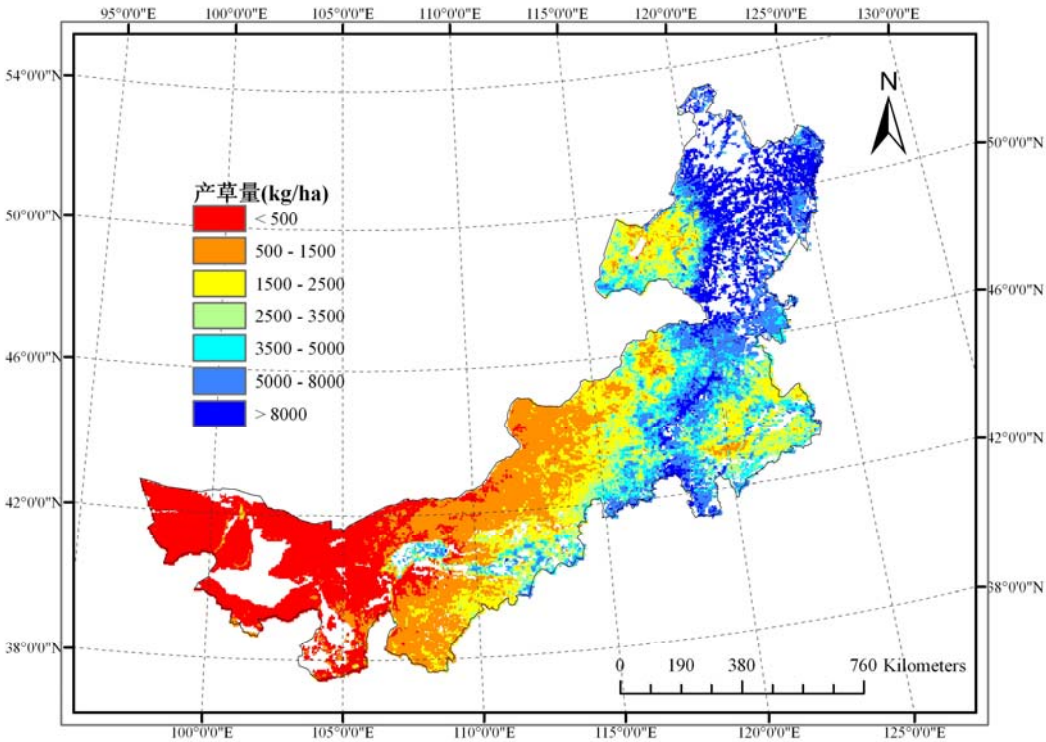


图 5-2. 鲜草产量分布图
Fig 5-2. Distribution map of fresh grass production

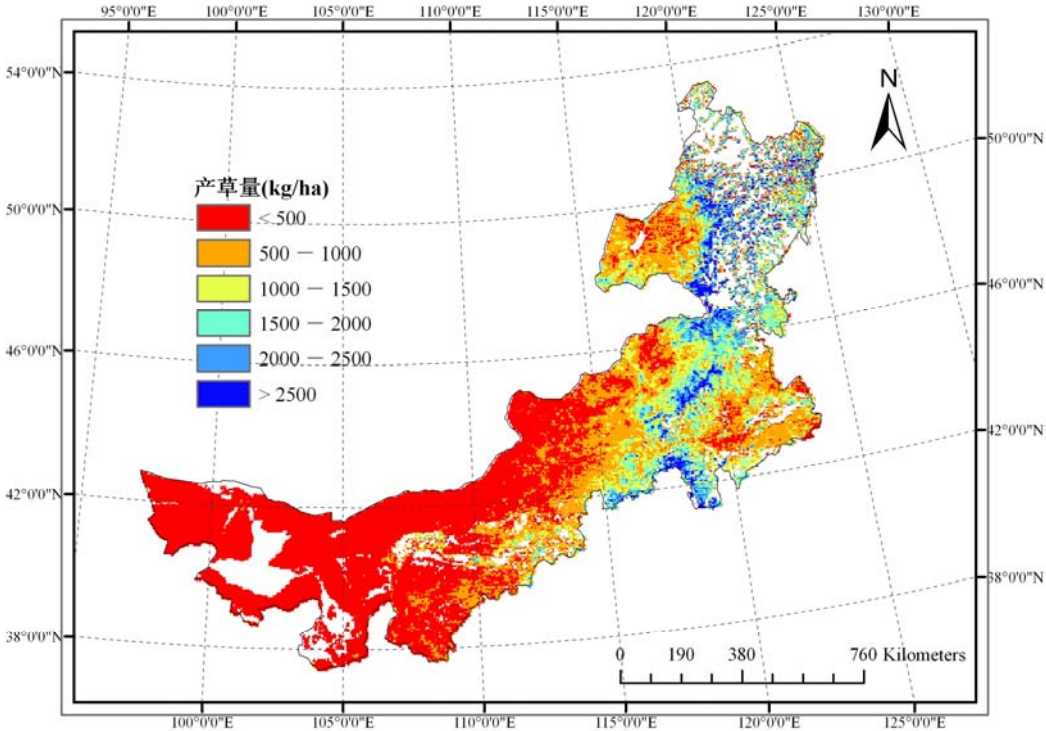


图 5-3. 干草产量分布图
Fig 5-3. Distribution map of hay production

第六章 结论与展望

本文以我国内蒙古草原为研究区，在系统回顾和总结国内外草地植被生物量遥感监测研究进展的基础上，着重研究了基于统计分析将地面样点数据扩展到二维平面空间的方法，即通过统计回归的方法在遥感数据和地面样方数据之间建立回归方程。由小尺度信息推知区域尺度信息，从宏观尺度上实现对内蒙古草原地面产草量的准确估算，为草原资源的合理利用、畜牧业的可持续发展和维护草原生态平衡提供了依据。

为了保证本文研究结论的可靠性，本文非常注重所使用的地面数据和遥感数据的质量。对于地面数据，严格核查；对与遥感数据，由于使用的是反射率产品，经过了大气校正，并利用质量控制波段剔除了有问题的像元，保留了各波段经过验证之后的最佳质量像元用来建模。即保证了最佳质量的地面—遥感数据的匹配。在此数据基础上进行分析，确保得出的结论是可信的。通过研究主要得到如下结论：

(1) . 通过对 TERRA/MODIS 和 AQUA/MODIS 两种数据的比较，发现 TERRA/MODIS 数据比较适合草原地面产草量的估算。无论是单波段、多波段还是植被指数作为估算指标，基于 AQUA/MODIS 数据建立的模型的决定系数普遍低于基于 TERRA/MODIS 数据建立的模型的决定系数。

(2) . 通过统计判断、敏感性分析和模型验证，综合两种植被指数在不同区域的优势，建立了包含两种植被指数的动态分区估算方法：

$$Y = \begin{cases} 360424 X_1^{1.368}, & RDVI \leq 0.22 \\ -43255 + 162385 X_2, & RDVI > 0.22 \end{cases}$$

其中，Y 为草原地面产草量，单位为 kg/0.25km²；X₁=RDVI，X₂=VI11。当 RDVI≤0.22 时，RRMSE=0.25，RRMSE=264.7 kg/hm²；当 RDVI>0.22 时，RRMSE=0.22，RRMSE=684.5 kg/hm²。本模型涵盖了四个波段，计算量小，容易实现，且精度可以满足大范围草原产草量监测。

(3) . 以产草量等于 1800 kg/hm² 作分界点，此时 RDVI=0.22，提出了动态分区的方法。与以往分区方法不同的是，同一子区在空间上是不连续的，不同子区在空间上相互镶嵌，并且子区的范围是随时间发生变化的，但保证给与每一子区较准确的估算结果。

(4) . 植被指数对产草量的敏感性是随植被密度变化的而不是一个常数。本文将敏感性分析与产草量估算进行结合，弥补了传统统计量 (R², RRMSE, RMSE) 判别的不足，对所建模型进行全面评价，综合了多种模型的优势，提高了估算方法的精度。

(5) . 将对植被水分敏感的短波红外波段引入植被指数中，构造了 12 种新的植被指数，相比常用的植被指数，与产草量拟合的决定系数略有提高，尽管提高幅度不大，但表现最好的指数 VI11 (包含三个波段：Band2, Band3 和 Band6) 克服了其它植被指数在高植被覆盖区饱和的饱和问题，这在地面验证中进一步得到了验证。

(6) . 最后，对模型进行实际应用，计算出在 2006 年 7 月下旬至 8 月上旬，内蒙古草原鲜草产量总计 185035241t·鲜草，折合干草为 57734725 t·干草；单产为 2337.8 kg·鲜草/hm²，折合成

干重为 729.4 kg·干草/hm²。

本文研究选用 2006 年夏季的地面实测数据和同步的双星 MODIS 产品进行估产模型的建立、比较和验证，所有的工作都是基于同一数据基础，保证了所得结果的可比性和可靠性；其次以大样本作为数据基础，保证了结果的代表性；最后以随机预留样点进行验证并进行了实际应用，保证了结果的实用性。

本文所做工作尚需进一步完善，今后应进一步开展以下研究：

(1) . 通常的分区模型都受到时间上的限制，不能在时间上进行扩展，但要建立各个时间段的模型也存在一定的难度。本文所建立的分段模型是一种动态分区模型，子区范围随时间发生变化，是否能在时间上进行扩展需要进一步验证。由于本文所获样本时间有限，没有在时间尺度上进行验证，今后可以做一些验证。

(2) . 对上午星和下午星上的 MODIS 数据在植被监测中的应用进一步探讨，挖掘其上波段在植被监测中的潜力，在今后的遥感建模中给与考虑。一方面通过双星结合来提高估算精度；另一方面，双星在时间上形成补充，将时间分辨率提高了两倍，可以对草原动态变化进行更精细的监测。

(3) . 本文只构建了 12 种包含短波红外的植被指数，并没有穷尽波段间的组合，只是依据已有的植被指数的波段组合来构造。从研究结果来看，短波红外的加入对植被监测的精度有所提高，因此就短波红外在植被监测中的应用应进一步探讨。

参考文献

1. 北京农业大学主编. 草地学. 中国农业出版社, 1992.
2. 陈全功, 卫亚星, 梁天刚. 使用 NOAA/AVHRR 资料进行牧草产量及载畜量监测地方法研究. 草业学报, 1994, 3 (4): 50~60.
3. 陈添宇, 陈乾. 用气象卫星资料估测甘南牧草产量. 见: 西北卫星遥感技术应用. 北京: 气象出版社, 1999, 93~96.
4. 蔡学彩, 李镇清, 陈佐忠等. 内蒙古草原大针茅群落地上生物量与降水量的关系. 生态学报, 2005, 25 (7): 1657~1662.
5. 黄敬峰, 王秀珍, 胡新博. 新疆北部不同类型天然草地产草量遥感监测模型. 中国草地, 1999a, 1: 7~11, 18.
6. 黄敬峰, 王人潮, 胡新博. 新疆北部天然草地产草量遥感监测预测模型研究. 浙江农业大学学报, 1999b, 25 (2): 125~129.
7. 黄敬峰, 王秀珍, 王人潮等. 天然草地牧草产量遥感综合监测预测模型研究. 遥感学报, 2001, 5 (1): 69~74.
8. 韩国栋. 降水量和气温对小针茅(*Stipa klemenzii* Roshev)草原植物群落初级生产力的影响. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2002, 33 (1): 83~88.
9. 黄富祥, 高琼, 傅德山等. 内蒙古鄂尔多斯高原典型草原百里香-本氏针茅草地地上生物量对气候响应动态回归分析. 生态学报, 2001, 21 (8): 1339~1346.
10. 金丽芳, 刘太平. 内蒙古达里诺尔地区草场产草量的遥感估算与监测. 草业科学, 1989, 6 (2): 13~17.
11. 李京, 陈晋, 袁清. 应用 NOAA/AVHRR 遥感资料对大面积草场进行产草量定量估算的方法研究. 自然资源学报, 1994, 9 (4): 365~374.
12. 李建龙, 黄敬峰, 蒋平. 不同类型草地监测与估产遥感指标和光学模型建立的研究. 新疆环境保护, 1996, 18 (2): 34~39.
13. 李建龙. 利用投影寻踪回归技术进行草地产量预报的研究. 草地学报, 1995, 3 (1): 65~74.
14. 李建龙, 黄敬峰, 王秀珍. 草地遥感. 气象出版社, 1997.
15. 李素英, 李晓兵, 莺歌等. 基于植被指数的典型草原区生物量模型——以内蒙古锡林浩特市为例. 植物生态学报, 2007, 21 (1): 23~31.
16. 龙瑞军, 牟新待, 陈功. 高山草地的光谱反射特征及其估产模型. 草业学报, 1994, 3 (2): 59~64.
17. 刘国华, 张洁瑜, 张育新等. 岷江干旱河谷三种主要灌丛地上生物量的分布规律. 山地学报, 2003, 21 (1): 24~32.
18. 刘钟龄, 李忠厚. 内蒙古羊草—十大针茅草原植被生产力的研究—I、群落总产草量的分析. 干旱区资源与环境, 1987, 1 (3-4): 13~33.
19. 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏等. 草地生物量的高光谱遥感估算模型. 农业工程学报, 2006, 22 (2): 111~115.

20. 牛志春, 倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型. 地理学报, 2003, 58(5): 695~702.
21. 牛建明. 气候变化对内蒙古草原分布和生产力影像的预测研究. 草地学报, 2001, 9(4): 277~282.
22. 彭晓鹃, 邓孺孺, 刘小平. 遥感尺度转换研究进展. 地理与地理信息, 2004, 20(5): 6~14.
23. 朴世龙, 方精云, 贺金生等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态报, 2004, 28(4): 491~498.
24. 任继周主编. 草业科学研究方法. 中国农业出版社, 1998.
25. 史培军, 李博, 李忠厚. 大面积草地遥感估产技术研究—以内蒙古锡林郭勒草原估产为例. 草地学报, 1994, 2(1): 9~13.
26. 陶伟国, 徐斌, 缪建明等. 草地遥感估产中不同尺度信息源关联方法对比及评价. 中国草地学报, 2006, 28(4): 68~74.
27. 陶伟国, 徐斌, 刘丽军等. 不同利用状况下草原遥感估产模型. 生态学杂志, 2007, 26(3): 332~337.
28. 唐世浩, 朱启疆, 王锦地等. 三波段梯度差植被指数的理论基础及应用. 中国科学(D辑), 2003, 23(11): 1094~1192.
29. 王正兴, 刘闯, 赵冰茹等. 利用 MODIS 增强型植被指数反演草地地上生物量. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 10~16.
30. 王艳荣, 雍伟义. 荒漠草原近地面反射特征研究—戈壁针茅(*Stipa gobica*)荒漠草原近地面反射光谱特征与产草量的相关分析. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1996, 27(5): 664~669.
31. 徐斌, 杨秀春, 陶伟国等. 中国草原产草量遥感监测. 生态学报, 2007, 27(2): 405~413.
32. 杨秀春, 徐斌, 朱晓华等. 北方农牧交错带草原产草量遥感监测模型. 地理研究, 2007, 26(2): 213~220.
33. 张佳华, 符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究. 测绘学报, 1999, 28(2): 128~132.
34. 赵冰茹, 刘闯, 刘爱军等. 利用 MODIS—NDVI 进行草地估产研究—以内蒙古锡林郭勒草地为例. 草业科学, 2004, 21(8): 12~15.
35. 赵冰茹, 刘闯, 王晶杰等. 锡林郭勒草地 MODIS 植被指数时空变化研究. 中国草地, 2004, 26(1): 1~8.
36. 赵艳霞, 周秀骥, 梁顺林. 遥感信息与作物生长模式的结合方法和应用—研究进展. 自然灾害学报, 2005, 1(14): 103~109.
37. 中华人民共和国农业部畜牧兽医司和全国畜牧兽医总站主编. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 353~354.
38. Aman A., Randriamananantena H.P., Podaire A., et al. . Up scale integration of normalized difference vegetation index: the problem of spatial heterogeneity. Geosciences and Remote Sensing, 1992, 30(2): 326~338.

39. Andrew J.E., John F.M., Sara J.M., et al. . Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote sensing of Environment*, 2000, 73:87~102.
40. Anderson G.L., Hanson J.D., Haas R.H. . Evaluating landsat thematic mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. *Remote sensing of Environment*, 1993, 45:165~175.
41. Baret F. and Guyot G. . Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 35:161~173.
42. Bella C.D.I., Faivre R., Ruget F., et al. . Remote sensing capabilities to estimate pasture production in France. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23):5359~5372.
43. Benie G.B., Kabore S.S., Goita K., et al. . Remote sensing-based spatio-temporal modeling to predict biomass in Sahelian grazing ecosystem. *Ecological Modelling*, 2005, 184 :341~354.
44. Bork E.W., West N.E., Price K.P. . Calibration of broad- and narrow-band spectral variables for rangeland cover component quantification. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(18), 3641~3662..
45. Cayrol P., Chehbouni A., Kergoat L., et al. . Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrument during the 1997–1999 SALSA experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105 :91~115.
46. Chehbouni A., Kerr Y., Qi J., et al. . Toward the development of a multidirectional vegetation index. *Water Resources Research.*, 1994, 30(5):12814~1286.
47. Curran P.J. and Williamson H.D. . Airborne MSS data to estimate GLAI. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, 8:57~74.
48. David P.R., Jordan S.B., Sadashiva D. . The MODIS Land product quality assessment approach. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83:62~76.
49. Davidson A. and Csillag F. . The influence of vegetation index and spatial resolution on a two-date remote sensing-derived relation to C4 species coverage. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 75:138~151.
50. Friedl M.A., Michaelson J., Davis F.W., et al. . Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15:1401~1420.
51. Genevieve R., Michael S., Frederic B. . Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55:95~107.
52. Guo X., Price K.P., Stiles J.M. . Modeling Biophysical Factors for Grasslands Using Landsat TM Data in Eastern Kansas. *The Transaction of Kansas Academy of Science*. 2000, 103(3-4):122~138.
53. Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Merzlyak M.N. . Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1996, 58:289~298.
54. Graetz R.D., Pech R.P., Davis A.W. . The assessment and monitoring of sparsely vegetated

- rangelands using calibrated Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9, 1201~1222.
55. Hill M.J., Donald G.E., Wheaton G.A., et al. . Remote sensing for precision pasture management in South Western Australia, In: *Proceedings of the 9th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*, UNSW, Sydney, July, 1998 CDROM.
56. Huete A., Justice C., Liu H. . Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49:224~234.
57. [Http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/VAL/](http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/LAND/VAL/).
58. [Http://edcdaac.usgs.gov/datatools.asp](http://edcdaac.usgs.gov/datatools.asp).
59. Jeffrey T.M., Jeffrey L.P., Christopher O.J. . A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83:77~96.
60. Jordan C.F. . Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1969, 50:663~666.
61. Kawamura K., Akiyama T., Yokota H., et al. . Monitoring of forage conditions with MODIS imagery in the Xilingol steppe, Inner Mongolia. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(7):1423~1436.
62. Lobo A., Moloney K., Chic O., et al. . Analysis of fine scale spatial pattern of a grassland from remotely sensed imagery and field collected data. *Landscape Ecology*, 1998, 13:111~131.
63. Liu H.Q., Huete A.R. . A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33:457~465.
64. Lei Ji, Albert J.P. . Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106:59~65.
65. Myneni R.B., Hall F.B., Sellers P.J., et al. . The interpretation of spectral vegetation indices. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33:481~486.
66. Moleele N., Ringrose S., Arnberg W. . Assessment of vegetation indexes useful for browse (forage) prediction in semi-arid rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(5):741~756.
67. Noy M.I. . Desert ecosystems t environment and producers. *Annum Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4:25~51.
68. Pickup G., Chewings V.H. . A grazing gradient approach to land degradation assessment in arid areas from remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15, 597~617.
69. Prince S.D., Goward S.N. . Global primary production :remote sensing approach . *Journal of Biogeography*, 1995, 22 :815~835.
70. Paruelo J.M., Lauenroth W.K. . Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, 1998, 25 (4):721~733.

71. Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., et al. . A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48:119~126.
72. Richardson A.J., Wiegand C.L. . Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, 43(12):541~552.
73. Rick L.L., William J.R. . Comparisons among vegetation indices and bandwise regression in a highly disturbed, heterogeneous landscape: Mount St. Helens, Washington. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 64:91~102.
74. Roujean J.L., Breon F.M. . Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51:375~384.
75. Shunlin Liang, Hongliang Fang, Mingzhen Chen. . Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83:149~162.
76. Todd S.W., Hoffer R.M., Milchunas D.G. . Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19:427~438.
77. Todd S.W., Hoffer R.M., Milchunas D.G. . Comparison of four vegetation indices for estimating aboveground biomass on grazed and ungrazed rangeland. 1993. ACSM/ASPRS Convention and Exposition Technical Papers, New Orleans, 15-18 February (Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 1993, 383~392.
78. Tucker C.J. . Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8:127~150.
79. Thenkabail P.S., Ward A.D., Lyon J.G., et al. . Thematic mapper vegetation indices for determining soybean and corn growth parameters. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 1994, 60:437~442.
80. Xu Bin, Yang Xiuchun, Tao Weiguo, Qin Zhihao, et al. . MODIS-based Remote Sensing Monitoring upon the Grass Production in China. *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. ISBN:84-370-6533X. Printed in Spain by Guada Impresores, 2006, 698~703.
81. Xu Bin, Qin Zhihao, Liu Jia, et al. . 2005.Remote Sensing Monitoring of Grassland in North China's Key Provinces.IEEE 2005 International Geosciences and Remote Sensing Symposium. South Korea, 3266~3269.
82. Yang W., Shabanov N.V., Huang D., et al. . Analysis of leaf area index products from combination of MODIS Terra and Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104: 297~312.

致 谢

三年的硕士研究生学习转眼间结束，回顾这三年走过的点滴路程，感慨颇多！对曾经关心、帮助过我的老师、同学、朋友以及家人致以深深的谢意。

首先衷心的感谢我的导师徐斌研究员。在论文的选题、研究方法的确定、文章的撰写和修改等工作当中倾注了极大的心血，开阔我的思路，解决我的疑惑。正是在导师的悉心指导下，才使我能顺利完成学业，并且无论是在学习能力还是科研能力上都有了很大的进步。衷心感谢徐斌老师对我的信任，在科研上给了我很多的机会，让我充分的发挥自己的才能。3年来除了在学习上、工作上谆谆的教诲和孜孜不倦的培养，在生活上的无微不至的关怀与父亲般的照顾，也使学生终身难忘！在将来的工作和生活中，我都会谨记这些教诲和指点，取得更大的进步。

感谢资源区划所唐华俊所长等各位领导在我读硕士期间给予的关心和帮助；感谢草地科学与生态室的邱建军研究员、覃志豪研究员等给予的多方面的指导和帮助，是他（她）们让我感受到了中国农科院资源区划所研究群体的独特亲和力、良好学术氛围和善于开拓创新的科学精神。

感谢农业部草原监理中心提供的地面数据及中心领导给予的支持与帮助。

感谢师姐杨秀春和郭守平，师兄黄治平、袁平、张志如在工作 and 生活中给予的关心和帮助。

感谢同窗李志斌、陈宝瑞、肖仲亮、刘丽军等对我生活和学习上的帮助，和你们的探讨开阔了我的思路，也使我学到了很多知识。还要感谢师六楼的其它师兄师姐师弟师妹们，谢谢你们陪我度过了这愉快的三年研究生生活。

最后，感谢我深爱的家人和女友李文娟，他们在生活上和学习上所给予的关怀和爱是无法言表的，希望能在将来的学习和工作中取得更大的进步，来报答他们殷切的期待。

衷心感谢所有帮助、指导、批评过我的人。

陶伟国

2007年6月

作者简历

姓名：陶伟国

性别：男

年龄：26

硕士专业：生态学

研究方向：草地遥感

攻读硕士期间参加过的科研项目

- 农业部项目，2005 年全国草原资源与生态遥感监测
- 农业部项目，2006 年全国草原资源与生态遥感监测
- 农业部援藏项目，西藏草原遥感监测管理系统的研制和开发
- 国家高新技术研究发展专项（863），草原监测管理系统关键技术研究（2006AA10Z242）
- 草原监理中心项目，全国 1:100 万草地资源图数字化加工处理
- 中国农科院项目，中国农科院首届杰出人才二级学科带头人基金

发表的文章

- [1] 陶伟国，徐斌，缪建明等. 草地遥感估产中不同尺度信息源关联方法对比及评价. 中国草地学报，2006，28（4）：68~74.
- [2] 陶伟国，徐斌，杨秀春. 草原产草量遥感估算方法发展趋势及影响因素. 草业学报，2007 16（2）：1~8.
- [3] 陶伟国，徐斌，刘丽军等. 不同利用状况下草原遥感估产模型. 生态学杂志，2007，26（3）：332~337.
- [4] 徐斌，陶伟国，杨秀春等. 中国草原植被长势 MODIS 遥感监测. 草地学报，28（4）：68~74.
- [5] 徐斌，陶伟国，杨秀春等. 我国退牧还草工程重点县草原长势遥感监测研究. 草地学报.（已接受，安排在 2007 年第 5 期）
- [6] 徐斌，杨秀春，陶伟国等. 中国草原产草量遥感研究. 生态学报，2007，27（2）：405~413.
- [7] 徐斌，辛晓平，陶伟国等. 草地超载状况该如何应对. 中国牧业通讯，2005，（21）：48~50.
- [8] 徐斌，杨秀春，侯向阳，陶伟国等. 草原产草量遥感监测方法进展. 科技导报约稿，2007，25（231）：5~8.
- [9] 杨秀春，徐斌，朱晓华，陶伟国. 北方农牧交错带草原产草量遥感监测模型. 地理研究，2007，

26 (2): 213~220.

- [10] Xu B, Tao WG, Yang XC, et al. Vegetation growth monitoring in the grassland of China using MODIS remote sensing data, 2nd International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Torrent (Valencia), Spain, 25-29 September 2006.
- [11] Xu B, Yang XC, Tao WG, et al. MODIS-based remote sensing monitoring upon the grass production in China, 2nd International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing Torrent (Valencia), Spain, 25-29 September 2006.
- [12] Xu B, Yang XC, Tao WG, et al. MODIS-based remote sensing monitoring of the grass production in China. International Journal of Remote Sensing. (待发) .

附表 1 国内外统计模型总结

作者	模型	决定系数	模型精度	模型描述	区域	样本数
吕玉华等 1990	乌珠穆沁中西部: $Y=0.4408/(1+\exp(1.0407-0.1078X))$	0.6783		x 有 AVHRR 资料提供的绿度值, $dx=dG$, 利用 G-t 曲线查取, G 为绿度值, Y 为产草量	内蒙古锡林郭勒盟	
	浑善达克沙地: $Y=45.415\exp(0.1754X)$	0.9166				
	预报模式: $Y=0.4408[1+\exp(1.0407-0.1178(x+dx))]$					
	预报模式: $Y=45.4145\exp(0.1754(x+dx))$					
史培军等 1994	$Y=186.228+0.310P-5.044Tp+15.121*2.7183^{4.674NDVI}$		95%	NDVI 有 NOAA 数据计算得到, P 为降水, Tp 为月平均温度, 通过就经纬度及海拔高度计算得到	内蒙古锡林郭勒草原	59
李京等 1994	大针茅、羊草干草原: $Y=26.298-61.0371G$	0.9025		绿度 $G=R2/R1$, R2 和 R1 为 NOAA/AVHRR 的第 1、2 通道	内蒙古锡林郭勒草原	15
	戈壁针茅、沙生针茅、无芒隐子草荒漠草原: $Y=18.219-154.966G$	0.9025				10
	克氏针茅、沙生针茅、冷嵩干草原: $Y=28.982-200.147G$	0.9604				8
	禾草与杂草类草甸草原: $Y=10.804-998.717G$	0.8649				7
李建龙 1996	温性平原荒漠类: $Y=1.0718(0.003T-0.0063SW+0.013ST-0.0325AT-0.0003PR-0.0024APR+0.7729NDVI+0.6335RVI)+0.0853(-0.0042T-0.0204SW-0.4102ST+0.2328AT-0.0072PR+0.0016APR+0.5525NDVI-0.7877RVI)$		84.60%	Y: 不同时间地点下的产草量(公斤/亩) RVI 和 NDVI 为 NOAA/AVHRR 计算得到的比值 遥感绿度值和归一化差遥感绿度值, SW 表示 0-50cm 土层的平均土壤含水量(%), AT 表示气温($^{\circ}C$), ST 表示地温($^{\circ}C$), PR 表示降水量(mm), APR 表示累计降水量(mm), T 表示时	新疆阜康县	
	低平地盐花草甸类: $Y=0.9814(-0.0037T-0.0326SW-0.0811ST+0.1217AT-0.0050PR+0.0010APR+0.5731NDVI+0.8057RVI)+0.0190(-0.0006T+0.0335SW-0.1347ST+0.1586AT-0.0064PR-0.0003APR+0.9370NDVI+0.2784RVI)$		88.60%			
	温性荒漠草原类: $Y=1.0107(0.0001T+0.0048SW+0.0193ST-0.0339AT-0.0009PR+0.0007APR+0.1866NDVI+0.9817RVI)+0.0189(0.0203T+0.0095SW+0.1574ST-0.7857AT+0.0270PR+0.0015APR+0.2465NDVI-0.2301RVI)$		83.50%			
	温性山地草甸草原类: $Y=0.9652(-0.0016T-0.0053SW+0.0195ST-0.0411AT-0.0001PR-0.0002APR+0.4429NDVI+0.8954RVI)+0.0090(0.0025T+0.0167SW+0.1186ST-0.0386AT+0.0004PR+0.0035APR-0.3592NDVI-0.9247R)$		92.30%			

VI)			间(指年季月),模型有投影寻踪回归技术得到	
王艳荣 1996	戈壁针茅无芒隐子群落 7 月: $1/Y=-0.07+0.1921/RVI3$	0.684	下标为 1,2,3 的植被指数分别代表, TM1, TM2, NOAA/AVHRR1, NOAA/AVHRR2 的反射率形成的指标	内蒙古锡林郭勒盟苏尼特右旗苏尼特左旗和乌兰察布盟达茂境内
	戈壁针茅无芒隐子群落 9 月: $Y=-113+23.1PVI2$	0.706		
	戈壁针茅多根葱群落 9 月: $Y=928+2548\ln(NDVI1)$	0.929		
	戈壁针茅冷蒿 8 月: $Y=-28.1+61.3RVI3$	0.573		
黄敬峰等 1999	$Y=178.34+665.666NDVI$	0.5211	NDVI 由 NOAA/AVHRR 数据计算得到	24
	$y=76.8534\exp(3.1838NDVI)$	0.348		17
	$y=63.4721\exp(0.7204NDVI)$	0.3		41
	$y=76.8534\exp(-0.6677NDVI)$	0.1881		32
	$y=124.1636\exp(4.6105NDVI)$	0.416		15
陈全功等 2004	$y=201.664+307.007NDVI$	0.399	NDVI(基于 MODIS),并将数据拉伸到 0-255, 采用逐步回归 Y:鲜重 Kg/hm ² X:NDVI	192
	春秋场: $Y1=137.8311+1.219613X$ $X\leq 190$			
	春秋场: $Y1=-90.3710+1.243571X$ $X>190$			
	冬场: $Y1=57.31877+0.021251X$ $X\leq 121$			
	冬场: $Y1=-579.465+5.148731X$ $X>121$			
	$Y1=89.00362+0.020369X$ $X\leq 212$			
	$Y1=950.4844+-2.6849X$ $X>212$			
覃志豪等 2004	$Y1=17.19495+0.411811X$ $X\leq 148$		GPP 为 NASA 网站上可免费下载的 MODIS 产品	中国北方草地
	$Y1=-23.9173+1.966378X$ $X>148$			
	$GPP<100g/m^2: Y=0.4936GPP$			
朴世龙等 2004	$100g/m^2\leq GPP\leq 500g/m^2: Y=18.8544+0.1452GPP+0.0004GPP^2$	72%	NDVI 有 NOAA 数据计算得到, 分辨率为 8*8km	991
	$GPP>500g/m^2: Y=12.2740+0.3798GPP+0.3819GPP^2$			
	$Y=179.71*NDVI^{1.6228}$	0.71		
赵冰茹 2005	草甸草原产量增长长期模型:		其中 Y 为鲜草产量(g/m ²),EVI 和 NDVI 为 1km 分辨率的 MODIS 植被指数产品,T	内蒙古
	$Y=0.012\ln EVI-0.187T+0.049P-0.162SH+6.781$	0.811		
	草甸草原产量减退期模型:			
	$Y=-0.219\ln EVI-0.013T+0.066P+0.135SH+3.463$	0.745		
	典型草原产量增长长期模型:			
	$Y=1.602NDVI-0.182T+0.05P-0.343SH+7.341$	0.715		

	典型草原产量减退期模型: $Y=5.192NDVI-0.01P-0.112T+0.015SH+4.979$	0.68	75%	为当月平均气温 C,P 为月降水量 (mm),SH 为地下 30cm 土壤湿 度,DEM 为海拔 高度(m)	14
	沙地典型草原产量增长长期模型: $Y=0.076LnEVI-0.006P+0.278T+0.59$	0.582	72%		15
	沙地典型草原产量减退期模型: $Y=0.66LnEVI+0.002P+0.015T+6.614$	0.536	68%		14
	荒漠草原产量增长长期模型: $Y=0.035LnEVI+0.015P+0.181T-1.165$	0.567	73%		13
	荒漠草原产量减退期模型: $Y=2.22LnEVI-0.017P+0.141T+6.036$	0.509	69%		12
	草原化荒漠产量增长长期模型: $Y=0.871LnEVI-4.934LnP+0.561T-0.051LnDEM+9.621$	0.503	67%		12
	草原化荒漠产量减退期模型: $Y=0.22LnEVI-0.516LnP+0.089T+0.042LnDEM+4.692$	0.403	65%		11
王正兴等 2005	5 月: $Y=2E-06NDVI^{2.1708}$	0.4789		NDVI 和 EVI 为 MODIS 植被指 数产品,Y 为同期 地上生物量	锡林郭勒草原 200
	6 月: $Y=0.0018EVI^{1.3853}$	0.3366			
	7 月: $Y=0.0024EVI^{1.4269}$	0.7023			
	8 月: $Y=0.0015EVI^{1.4951}$	0.5564			
	9 月: $Y=0.0002EVI^{1.8625}$	0.5051			
	草甸草原: $Y=0.1EVI^{67.672}$	0.6334			
	典型草原: $Y=1E-06NDVI^{2.2276}$	0.6229			
	荒漠草原: $Y=0.1019EVI^{67.262}$	0.5403			
	沙地草原: $Y=0.0012NDVI^{1.4952}$	0.4912			
	全部草原: $Y=0.0001EVI^{1.8072}$	0.5492			
Pearson et al 1976	Short grass prairie,Bouteloua gracilis dominant: Dry biomass=-45.2+51.2[radiance ratio(800nm/680nm)]	0.98		Handheld radiometer Airborne multispectral scanner g/m2	Pawnee, Colorado
	Dry biomass=-327.7+429.2(NIR/red)	0.79			
Richardson et al 1983	Cynodon spp: Biomass=-0.676+0.114(NIR)	0.73		Handheld radiometer kg/ha*1000	
King et al 1986	Lolium perenne/Trifolium repens: green dry=3.70-15.77r+20.00r ²	0.74		r=660nm/730nm Handheld radiometer Kg/ha	HFRO,Scotland
	Green dry=5.32-33.89r+67.05r ²	0.53			
Bedard and Lapointe	Hay fields: <i>Phleum pretense</i> , <i>Trifolium repens</i> , <i>Medicago sativa</i> : Log(green dry)=-0.35+2.77(NDVI)	0.85		Handheld radiometer	Quebec,Canda

1987	Predictions:observed vs predicted	0.80-0.92	g/0.25m ²	
Ase et al. 1987	Crested wheatgrass:green dry=-76.3+63.6(NDVI)	0.82	Handheld radiometer g/m ²	Mandan,North Dakota
	Mixed prairie:green dry=-54.8+367.2(NDVI)	0.89		
	Heavily grazed:green dry=-34.1+179.1(NDVI)	0.86		
Everitt et al 1989	Nitrogen fertilized grass plots: Biomass=559.18e ^{0.0889(R1100-R1300)-TM5}	0.92	Exotech radiometer Kg/ha	Mercedes,Texas
	Standing vegetation biomass: 1986:NDVI=0.0261+0.000074(biomass) 1987:NDVI=0.0310+0.000003(biomass) 1988=NDVI=0.0330+0.000075(biomass)	0.68 0.91 0.73	NOAA/AVHRR Kg/ha	Niger
Friedl et al 1994	Tallgrass prairie, <i>Andropogon and Sorghastrum spp</i> : Log(biomass) vs tasseled cap channel1(greenness) stratified by terrain or burning treatment	0.23-0.58	Landsat TM g/m ²	FIFE,Kansas
Todd et al 1998	Shortgrass prairie, <i>Boutelous gracilis</i> dominant: Burned areas only Standing crop=60.86+352.7(NDVI)	0.66	Landsat TM g/m ²	CPER,Colorado
	Burned areas only Standing crop=147.97+2.67(tasseled cap GVI)	0.67		
	Burned areas only Standing crop=313.73-3.16(RED)	0.64		
Hill et al 1998	Annual pastures: <i>Trifolium subterraneum Actotheca calendula</i> ,and annual grasses: (Field data aggregated into200 kg/ha classes)		Landsat TM Kg/ha	Mt.Barker,Weste rn Australia
	August biomass=-16204.8+23626.3(NDVI)	0.76		
	October biomass=-14537.8+24108.3(NDVI)	0.90		