

分类号: S127

学号: 20202312019

密级: 公开

单位代码: 10759

石河子大学

博士学位论文



基于星地遥感数据融合的土壤养分估测模型建立及肥力综合评价研究

学位申请人	范向龙
指导教师	张立福 研究员
	吕新 教授
	高攀 教授
申请学位门类级别	农学博士
学科、专业名称	作物学
研究方向	作物生产智慧管控
所在学院	农学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

分类号：S127

学号：20202312019

密级：公开

单位代码：10759

石河子大学

博士学位论文

基于星地遥感数据融合的土壤养分估测模型建立及肥力综合评价研究

学位申请人	范向龙
指导教师	张立福 研究员
	吕新 教授
	高攀 教授
申请学位门类级别	农学博士
学科、专业名称	作物学
研究方向	作物生产智慧管控
所在学院	农学院

中国·新疆·石河子

2025年6月

**Establishment of Soil Nutrient Estimation Model and Comprehensive
Evaluation of Fertility Based on Satellite-ground Remote Sensing Data
Fusion**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor of Agriculture

By

Fan Xiang-long

(Intelligent control of crop production)

Dissertation Supervisor: Researcher Lifu Zhang, Professor Xin Lv, and

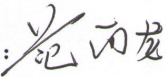
Professor Pan Gao

June, 2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

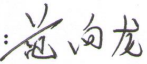
本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

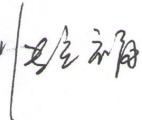
时间：2025年5月26日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

时间：2025年5月26日

导师签名：

时间：2025年5月26日

摘要

目的: 土壤养分是棉花生长所需的主要营养来源,也是衡量棉田土壤肥力的关键指标,为了快速、准确监测大尺度棉田土壤养分含量及肥力变化,本研究通过非负矩阵分解(NMF)方法融合地面高光谱数据和卫星遥感数据(Sentinel-2),深入分析地面高光谱、Sentinel-2 光谱以及两者融合光谱与土壤养分之间的光谱响应机制,构建土壤养分估测模型,评估融合光谱在大尺度棉田土壤养分估测中的应用效果。此外,本研究将微量元素纳入棉田土壤肥力评价指标中,构建更加科学、全面的土壤肥力评价体系,并通过星地遥感数据融合估测土壤综合肥力指数(IFI),旨在提升大尺度范围土壤肥力的估测精度与评价效率。在此基础上,构建棉田土壤养分综合管理及肥力评价系统,通过系统各模块的协同作用,实现棉田土壤养分和肥力的快速监测、传输、分析和评价,制定合理的施肥管理策略,对推动土壤资源的可持续利用和促进智慧农业的高质量发展具有重要意义。

方法: 本研究于 2021 年 10 月至 11 月在新疆北疆主要植棉区采集土壤样本 1047 份,测定土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、有效铁、有效铜、有效锰、有效锌和有效钼含量。在室内利用地物光谱仪获取土壤高光谱数据,在 Google Earth Engine(GEE)云平台上根据采样点坐标获取与大田取样时间相同的 Sentinel-2 光谱数据,通过竞争自适应权重采样法(CARS)筛选特征变量。利用光谱响应函数基于地面高光谱数据构建模拟光谱,使用非负矩阵分解(NMF)方法对 Sentinel-2 光谱和模拟光谱中的特征变量进行交替分解,从而提取出地面高光谱的光谱特征基矩阵和 Sentinel-2 光谱的样本差分系数校正矩阵,将其相乘获得融合光谱。通过柯尔莫哥洛夫-阿诺德网络(KAN)、多层感知器(MLP)和随机森林模型(RF)构建地面高光谱、Sentinel-2 光谱和融合光谱的土壤养分估测模型,并确定最优的建模策略。此外,通过土壤综合肥力指数(IFI)对棉田土壤肥力进行评价分析,比较星地遥感数据融合在直接和间接估测 IFI 中的准确性和可靠性,在此基础上,构建棉田土壤养分综合管理及肥力评价系统。

结果: (1) 探究了北疆棉田土壤养分空间变异特征与丰缺状况。经统计分析表明,速效钾含量为 360.3 mg/kg,高于新疆土壤背景值。各养分指标的莫兰指数值均大于 0,在空间上均呈现正相关,其中碱解氮的空间聚集性最强,速效磷的空间聚集性最弱。碱解氮的块金比为 0.061,空间相关性强,而有机质的块金比为 0.797,其空间相关性弱。各指标丰缺等级依次为:速效钾与有效钼处于极丰富水平,有机质与有效锌处于丰富水平,速效磷与有效铁处于中等水平,有效铜与有效锰处于缺乏水平,碱解氮处于极缺乏水平。

(2) 基于 NMF 方法融合地面高光谱和卫星遥感数据,并确定了适用于土壤养分估测的最优建模策略。结果表明,模拟光谱与 Sentinel-2 光谱在经过 NMF 分解后得到的基矩阵和系数矩阵之间具有极高的相似度(相关性大于 0.9),表明两者融合是可行的,同时,融合光谱与 Sentinel-2 光谱在

对应波段上相关性高，表明融合光谱能够更真实地反映土壤养分信息，提供了更丰富的特征向量和光谱信息，显著增强了卫星光谱变量与土壤养分之间的相关性，有效提高了大尺度棉田土壤养分含量的估测精度，尤其在 KAN 模型中，精度 (R^2) 提升了 11%~65%。空间分布显示，有机质含量在中西部较高。碱解氮含量在西部和中部较高，东南部较低。速效磷在北部地区含量较高。速效钾与有效铁的空间分布趋势相近，在西部和东部含量较高，中部较低。有效锰中部地区含量高，而有效锌表现相反。有效铜和有效钼空间分布相似，含量高的地区分布最广。

(3) 提出了一种基于星地遥感数据融合的土壤肥力评价新方法。将微量元素纳入土壤肥力评价指标中，实现了棉田土壤肥力评价的全面性和真实性。通过融合光谱直接估测 IFI 比间接估测 IFI 更加准确，其模型精度 (R^2) 提高了 41%。北疆棉田土壤肥力以较低水平为主，土壤样本占总样本数的比例最多 (52.4%)。肥力较高的区域较为稀少，零散地分布在各个地区。中等肥力区域较多，分布在中部地区。肥力较低的区域最多，集中在中部和中西部地区。肥力低的区域极少，零散地分布于西部、南部和东南部地区。

(4) 设计并构建了棉田土壤养分综合管理及肥力评价系统。通过系统需求和可行性分析，建立了数据库和模型库，为用户提供了高效便捷的土壤肥力评估工具。系统集成数据管理与分析、遥感监测、肥力评价及决策支持等功能模块，满足用户需求。结合了遥感技术和数据挖掘技术，即可快速监测棉田土壤养分和肥力变化，获取最新土壤信息。系统中的评价模型能够对土壤肥力深入分析和评价，实现可视化展示。经过初步测试，系统性能稳定，准确性高，符合实际需求，为该区域精准施肥提供有效依据。

结论： (1) 通过 NMF 方法有效融合了地面高光谱与卫星遥感数据，显著提高了卫星遥感在大尺度棉田土壤养分估测中的模型精度。(2) 构建了涵盖微量元素的土壤肥力综合评价体系，并提出了一种基于星地遥感数据融合的土壤肥力评价新方法，提高了棉田土壤肥力评价的准确性和时效性。(3) 建立了棉田土壤养分综合管理及肥力评价系统，集成数据管理与分析、遥感监测、肥力评价及决策支持等功能模块。研究结果为大尺度棉田土壤养分精准监测及肥力高效评价提供了有效的科学依据和技术支撑，对新疆地区土壤精细化管理、合理施肥及农业可持续发展具有重要意义。

关键词： 棉田；土壤养分；土壤肥力；遥感数据融合；综合评价

Abstract

Object: Soil nutrients are the main source of nutrients needed for cotton growth and the key indicators to measure soil fertility in cotton fields. In order to quickly and accurately monitor soil nutrient content and fertility changes in large-scale cotton fields, this study fused ground hyperspectral data and satellite remote sensing data (Sentinel-2) by non-negative matrix factorization (NMF) method, deeply analyzed the spectral response mechanism between ground hyperspectrum, Sentinel-2 spectrum and the fusion spectrum and soil nutrients, constructed a soil nutrient estimation model, and evaluated the application effect of fusion spectrum in large-scale cotton fields. In addition, this study incorporated trace elements into the soil fertility evaluation index of cotton fields to construct a more scientific and comprehensive soil fertility evaluation system, and estimated the comprehensive soil fertility index (IFI) through satellite-ground remote sensing data fusion, aiming at improving the estimation accuracy and efficiency of soil fertility on a large scale. On this basis, a comprehensive management and fertility evaluation system of soil nutrients in cotton fields is constructed. Through the synergy of various modules of the system, rapid monitoring, transmission, analysis and evaluation of soil nutrients and fertility in cotton fields are realized, and reasonable fertilization management strategies are formulated, which is of great significance to promote the sustainable utilization of soil resources and promote the high-quality development of smart agriculture.

Methods: In this study, 1047 soil samples were collected from October to November 2021 in the main cotton planting areas in northern Xinjiang, and the soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, available iron, available copper, available manganese, available zinc and available molybdenum contents were determined. The soil hyperspectral data was obtained indoors by a ground object spectrometer, and the Sentinel-2 spectral data with the same time as the field sampling time was obtained on the Google Earth Engine (GEE) cloud platform according to the coordinates of sampling points, and the characteristic variables were screened by competitive adaptive weight sampling (CARS). The spectral response function is used to construct the simulation spectrum based on the ground hyperspectral data, and the characteristic variables in the Sentinel-2 spectrum and the simulation spectrum are alternately decomposed by non-negative matrix factorization (NMF) method, so the spectral characteristic basis matrix of the ground hyperspectrum and the sample difference coefficient correction matrix of the Sentinel-2 spectrum are extracted, and the fusion spectrum is obtained by multiplying them together. The soil nutrient estimation model of ground hyperspectrum, Sentinel-2 spectrum and fusion spectrum was constructed by Kolmogorov-Arnold network (KAN), multi-layer perceptron (MLP) and random forest model (RF), and the optimal modeling strategy was determined. In addition, the comprehensive soil fertility index (IFI) was used to evaluate and analyze the soil fertility of cotton fields,

and the accuracy and reliability of satellite-ground remote sensing data fusion in direct and indirect estimation of IFI were compared. On this basis, a comprehensive management and fertility evaluation system of cotton fields was constructed.

Results:(1) The spatial variation characteristics and abundance and deficiency status of soil nutrients in cotton fields in northern Xinjiang were explored. Statistical analysis showed that the content of available potassium was 360.3 mg/kg, which was higher than the background value of Xinjiang soil. Moran index values of all nutrient indexes are greater than 0, showing positive correlation in space, among which alkali-hydrolyzable nitrogen has the strongest spatial aggregation, and available phosphorus has the weakest spatial aggregation. The nugget ratio of alkaline nitrogen is 0.061, which shows strong spatial correlation, while the nugget ratio of organic matter is 0.797, which shows weak spatial correlation. The order of abundance and deficiency evaluation of each index is as follows: available potassium and available molybdenum are at extremely abundant level, organic matter and available zinc are at abundant level, available phosphorus and available iron are at medium level, available copper and available manganese are at deficient level, and alkali-hydrolyzable nitrogen is at extremely deficient level.

(2) Based on NMF method, ground hyperspectral and satellite remote sensing data were fused, and the optimal modeling strategy suitable for soil nutrient estimation was determined. The results show that the simulation spectrum and Sentinel-2 spectrum have a very high similarity (correlation greater than 0.9) between the basis matrix and coefficient matrix obtained after NMF decomposition, which indicates that the fusion of the two spectrum is feasible. At the same time, the fusion spectrum and Sentinel-2 spectrum have a high correlation in the corresponding band, indicating that the fusion spectrum can more truly reflect soil nutrient information, provide richer eigenvectors and spectral information, and significantly enhance the relationship between satellite spectral variables and soil nutrients. The correlation effectively improves the estimation accuracy of soil nutrient content in large-scale cotton fields, especially in the KAN model, the accuracy (R^2) is increased by 11% ~ 65%. Spatial distribution showed that the organic matter content was higher in the central and western regions. The content of alkaline nitrogen was higher in the west and central regions and lower in the southeast. The content of available phosphorus is higher in the northern region. The spatial distribution trends of available potassium and available iron are similar, with higher contents in the west and east and lower in the middle. The content of available manganese is high in the middle area, while the content of available zinc is opposite. The spatial distribution of available copper and available molybdenum is similar, and the areas with high content are the most widely distributed.

(3) A more comprehensive and accurate soil fertility evaluation system of cotton fields was constructed, and a new soil fertility evaluation method based on satellite-ground remote sensing data fusion was proposed. Trace elements were incorporated into the evaluation index of soil fertility, and the comprehensiveness and authenticity of soil fertility in cotton fields were realized. Direct estimation of IFI

by fusion spectrum is more accurate than indirect estimation of IFI, and its model accuracy (R^2) is improved by 41%. The soil fertility of cotton fields in northern Xinjiang is mainly at a low level, and soil samples account for the highest proportion of the total samples (52.4%). Areas with higher fertility are scarce and scattered in various regions. There are more areas of moderate fertility, which are distributed in the central region. Areas with lower fertility are the most, concentrated in the central and central western regions. There are few areas with low fertility, and they are scattered in the western, southern and southeastern regions.

(4) A comprehensive management system of soil nutrients and fertility evaluation in cotton field was designed and constructed. Through system requirements and feasibility analysis, a database and model base are established, which provides users with efficient and convenient soil fertility evaluation tools. The system integrates functional modules such as user management, remote sensing monitoring, data management and analysis, fertility evaluation and decision support, and comprehensive service to meet the needs of users. Combining remote sensing technology and data mining technology, it can quickly monitor the changes of soil nutrients and fertility in cotton fields and obtain the latest soil information. The evaluation model in the system can deeply analyze and evaluate soil fertility, and realize visual display. After preliminary testing, the system has stable performance and high accuracy, which meets the actual needs, and provides an effective basis for precise fertilization in this area.

Conclusions:(1) The NMF method effectively fuses ground hyperspectral and satellite remote sensing data, which significantly improves the model accuracy of satellite remote sensing in soil nutrient estimation in large-scale cotton fields. (2) A comprehensive soil fertility evaluation system covering trace elements was constructed, and a new soil fertility evaluation method based on satellite-ground remote sensing data fusion was proposed, which improved the accuracy and efficiency of soil fertility evaluation in cotton fields. (3) A comprehensive management and fertility evaluation system of cotton field soil nutrients was established, which integrated functional modules such as data management and analysis, remote sensing monitoring, fertility evaluation and decision support. The research results provide effective scientific basis and technical support for accurate monitoring of soil nutrients and efficient evaluation of fertility in large-scale cotton fields, and are of great significance to refined soil management, rational fertilization and sustainable agricultural development in Xinjiang.

Key words: Cotton fields; Soil nutrients; Soil fertility; Remote sensing data fusion; Comprehensive evaluation

目录

摘要	I
Abstract	III
缩略表	IX
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 地面高光谱数据在土壤养分监测中的研究进展	3
1.2.2 卫星遥感数据在土壤养分监测中的研究进展	4
1.2.3 遥感数据融合在土壤养分监测中的研究进展	6
1.2.4 基于遥感技术的土壤肥力评价研究进展	8
1.2.5 土壤肥力评价系统研究进展	9
1.3 存在的问题	10
1.4 研究目的及内容	11
1.4.1 研究目的	11
1.4.2 研究内容	11
1.4.3 技术路线	13
第 2 章 研究区概况与数据获取	14
2.1 研究区概况	14
2.2 土壤样品采集与测定	14
2.2.1 土壤样品采集	14
2.2.2 指标测定	15
2.3 地面高光谱数据获取	15
2.4 卫星数据获取	16
2.4.1 Google Earth Engine (GEE) 云平台	16
2.4.2 Sentinel-2 卫星数据获取	17
第 3 章 北疆棉田土壤养分空间变异及丰缺评估研究	19
3.1 研究方法	20
3.1.1 异常值检测	20
3.1.2 正态分布检验	20
3.1.3 莫兰指数	20

3.1.4	半方差函数模型	21
3.1.5	普通克里金插值法	22
3.2	结果与分析	23
3.2.1	土壤养分统计分析	23
3.2.2	土壤养分空间分析	25
3.2.3	土壤养分丰缺评估	29
3.3	讨论	34
3.3.1	土壤养分空间变异及自相关性分析	34
3.3.2	土壤养分丰缺等级空间分布特征分析	34
3.4	本章小结	35
第 4 章	基于星地遥感数据融合的土壤养分估测模型构建研究	37
4.1	研究方法	37
4.1.1	光谱变换	37
4.1.2	植被指数	38
4.1.3	光谱特征筛选	39
4.1.4	数据融合	40
4.1.5	建模方法	45
4.2	结果与分析	49
4.2.1	基于地面高光谱数据的土壤养分估测模型构建	49
4.2.2	基于卫星 (Sentinel-2) 遥感数据的土壤养分估测模型构建	57
4.2.3	基于星地遥感数据融合的土壤养分估测模型构建	63
4.2.4	基于融合光谱反演的土壤养分空间分布	75
4.2.5	空间插值与遥感反演方法比较	79
4.3	讨论	79
4.3.1	光谱特征及相关性分析	79
4.3.2	非负矩阵分解方法有效性分析	81
4.3.3	模型性能分析	81
4.3.4	土壤养分空间特征分析	82
4.4	本章小结	83
第 5 章	基于星地遥感数据融合的土壤肥力综合评价研究	84
5.1	研究方法	84
5.1.1	土壤肥力计算	84
5.1.2	土壤综合肥力指数估测方法	86
5.1.3	土壤肥力评价标准	87

5.2 结果与分析	87
5.2.1 土壤综合肥力指数间接估测结果分析	87
5.2.2 土壤综合肥力指数直接估测模型构建	90
5.2.3 比较分析间接估测和直接估测 IFI 的准确性	95
5.2.4 土壤肥力评价及空间分布	96
5.3 讨论	97
5.3.1 土壤综合肥力指数光谱特征分析	97
5.3.2 土壤综合肥力指数估测方法比较分析	97
5.3.3 土壤肥力空间特征分析	98
5.4 本章小结	98
第 6 章 棉田土壤养分综合管理及肥力评价系统构建	100
6.1 棉田肥力评价系统描述和分析	100
6.1.1 系统功能需求	100
6.1.2 系统可行性分析	102
6.1.3 系统流程分析	103
6.2 棉田肥力评价系统组织结构与内容	106
6.2.1 系统设计目的	106
6.2.2 系统设计原则	107
6.2.3 系统设计框架	108
6.2.4 系统设计功能	109
6.3 棉田肥力评价系统应用案例分析	113
6.4 讨论	115
6.4.1 系统总体设计分析	115
6.4.2 系统功能及应用价值	116
6.5 本章小结	116
第 7 章 结论、创新点与展望	118
7.1 结论	118
7.2 创新点	119
7.3 展望	119
参考文献	121
作者简介	138
致谢	140

缩略表

英文缩写	英文全称	中文全称
ACu	Available Cu	有效铜
AFe	Available Fe	有效铁
AK	Available Potassium	速效钾
AMn	Available Mn	有效锰
AMo	Available Mo	有效钼
AN	Alkali-hydrolyzable Nitrogen	碱解氮
AP	Available Phosphorous	速效磷
AZn	Available Zn	有效锌
BI	Brightness Index	亮度指数
BI2	Brightness Index 2	第二亮度指数
CARS	Competitive Adapative Reweighted Sampling	竞争自适应权重采样法
DVI	Difference Vegetation Index	差值植被指数
EVI	Enhanced Vegetation Index	增强植被指数
EVI-2	Enhanced Vegetation Index-2	增强植被指数-2
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	绿色归一化差值植被指数
GRVI	Green-Red Vegetation Index	绿红植被指数
IFI	Integrated Fertility Index	土壤综合肥力指数
KAN	Kolmogorov-Arnold Network	柯尔莫哥洛夫-阿诺德网络
MLP	Multilayer Perceptron	多层感知器
MSAVI	Modified Soil-Adjusted Vegetation Index	改良土壤调整植被指数
MSISV	Sentinel-2A MSI Spectral Variables	Sentinel-2 光谱变量
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	归一化植被指数
NMF	Non-negative Matrix Factorization	非负矩阵分解
OM	Organic Matter	有机质
OSI	Operation Status Index	优化光谱指数
PLSR	Partial Least Squares Regression	偏最小二乘回归
RDVI	Renormalized Difference Vegetation Index	再归一化植被指数
RF	Random Forest	随机森林模型
RI	Ratio Index	比值指数
RII	Reddish Index	红色指数
SATVI	Soil-Adjusted Total Vegetation Index	土壤调节总植被指数
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	土壤调整植被指数
SRF	Spectral Response Function	光谱响应函数
SSV	Simulated Spectral Variables	模拟光谱变量
TVI	Transformed Vegetation Index	转换植被指数

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

土壤不仅是地球生态系统的重要组成部分，也是人类生存和植物生长的物质基础，对维持生态平衡、保护生物多样性以及调节气候等方面具有重要作用（Steffan et al., 2018）。土壤肥力作为土壤的基本特征，反映了土壤的物理结构和化学性质，对作物的生长发育和产量具有决定性作用（Rabia, 2012）。土壤养分是体现土壤肥力最重要的指标，也是植物生长所需营养元素的基本来源（Voltr et al., 2021）。土壤养分的缺失和不平衡会直接导致农作物营养缺乏，从而影响作物生长和粮食产量，破坏生态环境。评价土壤肥力是对土壤养分丰缺及肥力高低的分析和评定，是土壤质量评价的重要组成部分之一。随着对土壤养分研究的深入，土壤养分空间变异不仅具有普遍性和连续性，还受到多重因素的共同影响，包括气候、地形、母质、土壤类型以及人为管理措施等（潘昱伶等, 2023）。因此，全面准确了解土壤养分空间变异性及分布规律，有利于制定有效的田间施肥管理策略，对智慧农业的实施具有重要意义。

新疆地区因其独特的地理条件和成熟的农业技术，成为我国绿洲农业的核心区域之一。棉花是当地重要的经济作物之一（Li et al., 2020），2024年新疆棉花占全国棉花产量的92.2%，占全球产量的22.2%（国家统计局, 2024）。然而，随着膜下滴灌技术的普及，农膜在田间不断积累，并且伴随着长期连作以及化肥、农药、农膜的大量使用，使得棉田土壤养分和肥力发生了显著变化，导致土壤污染加剧、土壤养分流失严重，生态环境面临潜在风险（Fan et al., 2023）。党的二十大报告提出了坚持“绿水青山就是金山银山”的发展理念，推动经济社会发展向绿色、低碳转型，在此背景下，科学评估新疆棉田土壤养分，对于精准施肥、提高肥料利用率和改善土壤质量至关重要。当前，新疆棉田土壤肥力评价体系的构建主要基于大量元素，而棉花生长不仅依赖大量元素，而且对微量元素的需求同样重要，微量元素在维持棉花生理功能、提高产量和品质等方面发挥着关键作用。因此，将微量元素纳入土壤肥力综合评价指标中，不仅可以更加全面、真实地反映棉田土壤肥力水平，还可以促进棉花产业可持续发展，从而推动区域农业高质量发展。

传统土壤养分含量测定方法主要依赖于人工野外采集土壤样本，然后在实验室通过化学试剂溶液对土壤中的养分元素进行测定，该方法虽然测量精度很高，但存在费时、费力、污染环境等问题（Abdulraheem et al., 2023），而且调查结果滞后，难以获得大区域范围内土壤养分含量的空间分布信息以及动态监测需求（Diaz-Gonzalez et al., 202

2)。遥感技术能够快速、准确获取丰富的土壤养分信息，对土壤养分和肥力评估提供了有效技术手段，在土地利用、土壤调查和土壤养分监测中具有不可替代的作用（Abd elRahman et al., 2021）。地面光谱、低空遥感和卫星遥感是遥感技术获取土壤信息的主要数据源（Francis et al., 2024）。然而，单一遥感数据难以快速满足大面积、高精度监测要求（Jia et al., 2024），为应对这一挑战，多源遥感数据的融合逐渐成为研究热点。常见的融合方式包括卫星遥感图像的融合、无人机与卫星图像融合（Khaliq et al., 2019），以及地面高光谱与卫星遥感的融合（胡天宇等，2023）。其中，地面高光谱通常具有较高的光谱分辨率和丰富的光谱波段，能够提供精准的土壤光谱信息，但是监测范围有限，而卫星遥感能够快速获取大区域尺度的土壤养分信息，但光谱分辨率较低，难以获取精细的地物信息，因此，通过融合高光谱与卫星遥感数据，可以实现土壤养分监测的最大效益。

目前，地面高光谱与卫星遥感数据的融合主要通过建立两者之间的光谱关系，并利用光谱的平均反射率对卫星数据进行校正（Bukowiecki et al., 2021）。然而，在区域尺度上，该方法难以有效表达土壤样本之间的光谱异质性，无法精准捕捉某些关键信息，限制了在土壤属性反演中的应用效果（Ma et al., 2021）。非负矩阵分解（Non-negative Matrix Factorization, NMF）作为一种强大的数据处理技术，能够提取数据中的主要特征，减少冗余，提高数据的可解释性，实现简便，对数据适应性强，已逐渐应用于遥感领域（王瀛等，2018）。此外，利用大数据挖掘技术对土壤数据进行采集、标准化处理、公开发布，让数据资源、技术资源和信息资源得以高效利用，实现了资源的集成与共享（Cravero et al., 2022），并且通过线性模型、非线性模型（机器学习、深度学习）等对土壤属性及肥力进行预测和评估，构建土壤肥力评价系统，不仅有助于改善和提高土壤养分及肥力，而且能够指导农业工作者精准施肥，提高土壤管理措施，对土壤的全面研究和可持续利用具有重要的理论意义和实用价值。

因此，本研究围绕新疆北疆棉田土壤养分估测及肥力评价展开研究，分析土壤养分空间变异及丰缺状况。通过 NMF 将地面高光谱与卫星数据进行融合，探究地面高光谱、卫星遥感以及融合光谱与土壤养分的光谱响应机制，构建土壤养分及肥力估测模型，评估融合光谱在大尺度范围土壤养分及肥力估测中的模型效果。此外，将微量元素纳入土壤肥力评价指标中，使用 IFI 对棉田土壤肥力进行评价，比较分析通过融合光谱直接与间接评价土壤肥力的准确性，基于最优方法绘制土壤养分和肥力的空间分布图，并构建棉田土壤养分综合管理及肥力评价系统，为新疆区域尺度棉田土壤肥力状况的快速评估和精准施肥提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地面高光谱数据在土壤养分监测中的研究进展

遥感技术通过传感器捕捉土壤信息，包括其物理、化学和生物学特性的光谱特征，由于土壤在电磁波谱上的反射、吸收和发射光谱之间存在特定的关系，使得土壤属性在电磁波谱中呈现出独特的光谱特征，通过分析这些光谱特征，可以识别和推断出相应的土壤属性（Salazar et al., 2020）。高光谱遥感技术自 20 世纪 80 年代以来得到了快速发展（樊丽等，2022）。近 30 年，高光谱遥感技术与化学、地理学、计算机技术等学科交叉，已经克服传统遥感技术的局限性，逐步成为国际遥感技术研究的热点（柴瑜，2023）。随着应用范围的扩大，高光谱技术在农业、环境保护、资源勘探等领域均得到了广泛的应用（Shukla and Kot, 2016）。高光谱技术通过远距离感知目标的电磁波反射或自身辐射，包括可见光和红外波段，实现目标探测与识别（Wan et al., 2022），该技术以非接触的方式，利用传感器远程获取目标地物信息，根据人们的实际需求，通过搭载不同平台的传感器获取不同尺度的目标地物信息（Hänel et al., 2019）。高光谱数据通常包含成百上千条光谱波段信息，具有光谱分辨率高的优势（Ravikanth et al., 2017），其紧密且连续的光谱波段能够捕捉土壤理化性质的微弱变化，可以实现对地物的快速区分与鉴别（陶培峰等，2020），为土壤氮、磷、钾等养分元素含量的估算提供了可靠的数据基础（蒋烨林等，2016），在土壤养分定量遥感监测中发挥着越来越重要的作用。相关研究表明，高光谱技术能够探测其所包含光谱范围内目标土样产生的辐射来生成土壤光谱，根据土壤的成分差异，辐射会导致土壤中单个分子键（NH、OH 和 CO 等基团）产生弯曲或拉伸振动，造成不同波段范围内光信号的吸收或反射特征不同，从而生成特定形态的土壤反射光谱（Shen et al., 2020）。

基于地面高光谱的土壤养分含量估测通常以光谱仪采集的土壤反射率作为光谱数据源，依据土壤光谱反射率与土壤养分含量之间存在的关系，通过不同统计建模方法构建土壤养分估测模型（Viscarra et al., 2022）。1993 年，便携式地物光谱仪的诞生大大推动了土壤高光谱的研究进展，大量学者对土壤中不同养分元素的光谱信息进行研究。张超等（2018）研究发现土壤养分含量与高光谱反射率在可见光区（400~760 nm）和近红外区（760~1100 nm）相关性较高，基于连续投影算法提取光谱特征所构建的支持向量机模型具有普适性好和反演精度高的优势。唐海涛等（2022）通过竞争自适应重加权采样（CARS）筛选出土壤有机质的特征波段，并将全波段数目压缩至 16% 以下，降低高光谱变量维度和计算的复杂程度，提高了模型的预测能力。章文龙等（2015）基于原始光谱反射率、比值土壤指数、归一化土壤指数和有机质诊断指数建立土壤全磷含量估算模型，发现光谱指数与全磷的相关性较高，决定系数在 0.657~0.805。Wang 等（2022）