

高光谱遥感技术在土壤研究应用中的进展

刘 勋¹, 李长春¹, 李双权^{2*}, 马玉凤², 杜 军²

(1. 河南理工大学, 河南焦作 454000; 2. 河南省科学院地理研究所, 河南郑州 450052)

摘要 土壤反射光谱的特性和土壤物理性质之间的关系, 为遥感技术在土壤中应用奠定了坚实的物理基础。此外, 高光谱遥感技术的迅猛发展为快速、高效提取土壤信息提供了科学的技术手段。针对高光谱在土壤中的应用情况, 首先对高光谱遥感的发展历程、特点以及优势进行总结阐述, 然后分别总结高光谱遥感在土壤有机质、含水量、重金属及土壤质地等方面中的应用现状, 并对其研究方法进行总结分析, 最后探讨高光谱遥感技术在土壤研究应用中在研究方法和时间、空间尺度上的不足以及今后高光谱遥感在土壤研究中的发展方向。

关键词 土壤; 反射光谱; 遥感技术; 高光谱

中图分类号 S127 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)08-0018-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.08.004



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application Progress of Hyperspectral Remote Sensing Technology in Soil Research

LIU Xun¹, LI Chang-chun¹, LI Shuang-quan² et al (1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000; 2. Institute of Geography, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou, Henan 450052)

Abstract The relationship between the characteristics of soil reflectance spectra and the physical properties of soil lays a solid foundation for the application of remote sensing technology in soil. In addition, the rapid development of hyperspectral remote sensing technology provides scientific and technological means for extracting soil information quickly and efficiently. In view of the application of hyperspectral in soil, this paper firstly summarized the development history, characteristics and advantages of hyperspectral remote sensing, and then summarized the hyperspectral remote sensing in the fields of soil organic matter, water content, heavy metals and soil texture. The application status and the research methods were summarized. Finally, the shortcomings of the hyperspectral remote sensing technology in the research methods and time and space scales in soil research applications and the future development of hyperspectral remote sensing in soil research were analyzed.

Key words Soil; Reflection spectrum; Remote sensing technology; Hyperspectral

土壤是指在地球陆地表面上能够生长植物的疏松表层, 不仅是陆地生态系统的重要一员, 而且是人类赖以生存和发展的重要物质基础^[1]。土壤是一个综合且复杂的生态系统, 土壤的定量评价与研究一直以来都是土壤学科的重点与难点。大量研究表明, 土壤反射光谱的特性与土壤物理性质之间的关系, 为遥感技术在土壤中应用奠定了坚实的物理基础, 同时也为研究土壤自身属性提供了一个崭新的方法^[2-3]。

20 世纪 80 年代初, 高光谱遥感技术的出现为遥感技术的发展揭开了新篇章, 与此同时它的诞生也是人类历史上在对地观测领域取得的重大技术突破之一^[4]。高光谱遥感可以产生一条连续窄带短波红外光谱信息, 并能够将反映物质组成成分的地物光谱曲线与反映地物空间分布格局的影像相结合, 可以同时进行土壤表面状况与其性质的空间信息监测, 为观测地物、认识世界提供一种有效手段^[5-6]。高光谱遥感技术以其特有高分辨率, 使得空间对地观测时可以获得更为全面的地面信息状况, 因此, 被受国内外专家学者的广泛关注与应用。笔者对高光谱遥感技术在土壤中的应用现状进行了论述, 主要针对其在土壤有机质、土壤含水量、土壤重金属含量和土壤质地反演方面的应用进行介绍, 并对其研究方法加以概括, 最后论述了目前高光谱在土壤中应用的问题及其今后发展方向。

1 高光谱遥感

高光谱遥感是高光谱分辨率遥感(hyperspectral remote sensing)的简称, 它是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外、中红外和热红外波段范围内, 获取许多非常窄且光谱连续的影像数据的技术^[7]。

1.1 发展历程 起初, 高光谱遥感数据的主体一直都是航空高光谱遥感影像, 并且这方面的研究都掌控在一些比较发达国家。1983 年, 世界上第一台成像光谱仪(AIS-1)在美国诞生, 之后由其获取的第一幅高光谱遥感影像呈现在世界面前, 同时, 该成像光谱仪在植被生化特征、矿物填图等方面的成功应用, 初步展现出了高光谱遥感技术的魅力, 开创了高光谱分辨率和高空间分辨率二者相结合的成像光谱遥感技术的新纪元^[8]。之后, 各国又相继研制出不同种类的成像光谱仪, 比如德国 ROSIS, 美国的 AVIRIS、DAIS、TRWISⅢ, 澳大利亚的 HyMap 和加拿大的 FLI、CASI 等^[9]。

经过航空试验并被成功应用以后, 20 世纪 90 年代末高光谱正式进入到航天发展领域, 从此高光谱遥感技术的发展出现新的转机。以美国、欧盟和日本为代表的发达国家相继在高光谱遥感技术上取得突破, 发射了高光谱卫星。2002 年初, 欧洲太空局成功发射搭载了分辨率高达 0.035 cm 的主动大气探测麦克尔逊干涉仪 MIPAS 与大气痕量气体扫描成像光谱仪 SCAMACHY 的 ENVISAT-1 卫星^[10]; 2009 年初, 日本成功发射携带了高光谱温室气体观测探测器(TANSO)的 GOSAT 卫星, 该卫星主要用来实时监测全球大气中 CO₂ 与 CH₄ 含量^[11]。

基金项目 国家自然科学基金项目(41501013); 河南省基础前沿研究项目(162300410053); 河南省软科学研究计划项目(182400410512)。

作者简介 刘勋(1991—), 男, 河南永城人, 硕士研究生, 研究方向: 遥感应用。

收稿日期 2018-11-21

1.2 特点与优势 常规遥感的局限性在于波段太少、光谱分辨率低、波段宽一般大于 100 nm 以及波段在光谱上不能连续、且不能覆盖可见至红外整个光谱范围,这样使得遥感的应用领域大为减少。高光谱遥感技术成功地打破了这一局限,与传统遥感相比高光谱遥感主要具有波段数目多且窄、光谱分辨率高、光谱范围宽、数据量大、信息冗余增加以及数据描述模型多,分析更为灵活等特点^[12]。除此之外,高光谱的光谱数据和其图像数据能够有机地结合在一起,真正实现“图谱合一”,可以把在高光谱遥感影像上获得的光谱曲线和地面实测地物光谱曲线两者进行实时比较^[13]。

随着高光谱成像的光谱分辨率不断地提高,其探测能力也大大增强^[14]。与全色和多光谱成像相比较,高光谱成像具有以下显著优势^[15-16]:①有着近似连续的地物光谱信息;②地表覆盖探测和识别能力大大提高;③地形要素分类的识别方法灵活多样;④定量和半定量分类识别地形要素将成为可能。

2 高光谱遥感在土壤研究中的应用

2.1 应用范围 随着高光谱遥感技术的不断成熟,其空间和光谱分辨率不断地提高,应用领域也越来越广。其中,高光谱在土壤研究中的应用历史可以追溯到 19 世纪 20—30 年代。刚开始,人们利用反射光谱研究土壤含水量、土壤组分、粒径及有机质含量^[17],之后,大量的研究表明,高光谱遥感技术被广泛地用于反演土壤中有机质含量、含水量、重金属及土壤质地等方面的研究应用。

2.1.1 土壤有机质含量 土壤有机质(soil organic matter, SOM)是指存在于土壤中的有机物质,可以提供植物所需的养分,而且其含量的多少也是作为衡量土壤肥力的一项重要指标^[18]。如今,通过光谱分析技术测定土壤有机质含量已成为一种不可或缺的研究手段,国内外专家分别运用不同的遥感数据来反演土壤有机质含量,并取得了一定成效^[19-24]。

Al-Abbas 等^[25]利用光谱分析技术对土壤的有机质含量进行估测研究,结果表明其有机质含量与光谱反射率之间存在明显的负相关关系。韩兆迎等^[26]研究发现,土壤光谱数据在经过包络线处理之后能够显著提高土壤有机质和光谱反射率之间的相关性,并据此筛选出 7 个相关性较高的敏感波长。王玉华等^[27]通过研究室内实测土壤光谱反射率和土壤有机质含量之间的关系,结果表明,在波长 675 nm 处土壤反射率与其有机质含量高度相关。

2.1.2 土壤含水量 土壤含水量是地球生态系统能量交换过程中非常重要的因子,同时也是农业、气候、生态等领域衡量土壤干旱程度的重要指标^[28]。土壤含水量的遥感定量反演一直都是专家们研究热点,相关研究表明,土壤光谱反射率会随着土壤含水量增加而降低,含水量低的土壤具有较高的光谱反射率,即表现出负相关的关系,因而土壤光谱反射率的变化能够直接反映出土壤表层的含水量变化^[29]。李晨等^[30]认为滨海盐土土壤含水量与光谱反射率呈显著负相关,特征波段位于光谱反射曲线的 2 个峰谷(1 440、1 930 nm)附近,且最大相关系数出现在 1 930 nm 处;但是,

当土壤中的含水量达到一定度时,光谱反射率与土壤含水量二者之间将不再存在负相关的关系,而是呈现出正相关。研究发现,土壤含水量与光谱之间存在一个阈值(300 g/kg),当土壤样品中的含水量达到该阈值时,土壤光谱反射率就会与土壤含水量呈现出正相关的关系^[31]。

2.1.3 土壤重金属含量 随着社会经济不断的发展,城镇化、工业化的快速进程,土壤中重金属含量不断加剧,严重地影响了土壤环境的质量。土壤重金属在土壤中残留时间长、迁移性差且易积累,并能够通过食物链进入人体,对人体造成威胁,因而备受学者们关注。高光谱技术的出现可以实现对土壤重金属含量进行快速、高效的监测。土壤中重金属富集主要是由于土壤组分的吸附所造成的^[32],诸多学者根据这一性质来定量估算土壤重金属含量。Gannouni 等^[33]通过对 Jalta 和 Bougrine 的矿山废物研究发现,利用铁矿物可以间接反演土壤重金属,利用铁矿物能够较好地预测 Pb 和 Zn 元素。程先锋等^[34]研究发现,Zn、Cd、As、Pb 等 4 种金属元素在滇西兰坪铅锌矿区的主要影响因素为土壤中有机质、铁氧化物及黏土矿物,并表现出高度变异性 and 显著相关性。目前,国内外学者通过高光谱技术已经成功对 Cu、Zn、Cd、As、Cr、Ni、Pb 与 Hg 等重金属在土壤中的含量进行预测,其技术手段也越来越成熟。

2.1.4 土壤质地 土壤质地是依据土壤粒径大小来划分的土壤类型,是影响土壤理化性质极其重要的因子之一,通常可以分为砂、粉砂以及黏土。土壤质地除了能从土壤粒径大小影响土壤光谱反射率之外,还可以通过影响土壤的持水能力从而间接对土壤光谱反射率造成一定的影响。研究表明,土壤中颗粒粒径的大小与其反射率之间存在一定的相关性,粒径越小,其比表面积就越大,反射率也相应越大^[35]。Bowers 等^[36]通过对土壤质地和土壤光谱反射曲线的关系研究,结果发现土壤反射率随着土壤粒径的变小呈现出指数增长,特别是在土壤粒径 $\leq 0.000\ 4\text{ mm}$ 时,此规律更加明显。李春蕾等^[37]对于干旱区裸地土壤含砂量的研究结果显示,干旱区裸地土壤砂粒含量的特征波段在 430 nm 处,对实测土壤光谱反射率进行数学变换后,其与土壤砂粒含量的相关关系同样在 430 nm 处达到最强。不同土壤粒径的光谱反射率在全波段、可见光、红外波段都呈负相关关系,土壤反射光谱最大吸收值所对应的波段位置与粒径的处理方式无关,经过不同粒径处理的土壤其光谱吸收峰值随土壤粒径的减小呈现出多项式变化的规律,不同的土壤类型,其土壤光谱反射率与粒径变化基本相同,即随着土壤颗粒粒径变小,土壤光谱反射率均呈幂函数增长^[38]。

2.2 研究方法 高光谱遥感技术在土壤研究中常用的反演方法如表 1 所示,这些方法所建立的反演模型都能达到精度要求。目前常规反演方法在土壤研究中均有应用,其中逐步多元线性回归法和偏最小二乘回归法 2 种方法的应用相对更为广泛。然而,研究者为了追求更高的反演精度,越来越多的非常规模型,如支持向量机模型、模糊识别模型、Hapke 模型及 GWR 模型等,被引入土壤研究中,并在各自的研究区

域内取得了较为不错的成果。越来越多建模方法的出现及成功应用,标志着高光谱遥感技术在土壤信息定量反演中已日趋成熟。

表1 土壤研究中常用反演方法总结
Table 1 Summary of commonly used inversion methods in soil research

序号 No.	研究方法 Research methods	参考文献 References
1	多元逐步线性回归(SMLR)	[27]、[30]、[34]、[40]、[48]
2	偏最小二乘回归(PLSR)	[41]、[45]、[49]、[52]
3	人工神经网络(ANN)	[46]、[53]、[56]
4	模糊识别模型	[24]
5	支持向量机模型	[43]
6	Hapke 模型	[50]
7	GWR 模型	[55]

2.2.1 土壤有机质。目前,大多数学者通过光谱反射率数据在对土壤有机质含量进行定量反演研究时,主要运用偏最小二乘回归和多元逐步线性回归的方法建立反演模型^[39]。Hummel 等^[40]通过研究土壤有机质与近红外光谱反射率间的相关关系,构建了预测土壤有机质含量的多元逐步回归反演模型。李胜男等^[41]在对黑土研究中发现,土壤光谱反射率在经过倒数和对数处理后的数据所建立的最优模型都为最小二乘回归模型,而对土壤光谱反射数据进行一阶微分处理后,建立的最优模型则为逐步多元线性回归模型。由此可以得出,建模方法的选择在一定程度上会影响高光谱反演土壤有机质含量的精度。此外,针对土壤有机质和高光谱反射数据受多重因素的影响,且二者之间有可能存在非线性关系等问题,专家学者们通过 BP 人工神经网络模型^[42]、支持向量机模型^[43]及模糊识别模型^[24]分别建立土壤有机质高光谱反演模型,并取得了较好的成果。

2.2.2 土壤含水量。近年来学者们大多通过土壤反射光谱数据,建立光谱反射率和土壤含水量之间的相关估算模型来进行土壤含水量遥感定量反演。在建模方法上,目前学者主要采用线性回归分析法^[44]、偏最小二乘回归法^[45]、BP 神经网络^[46]、小波分析^[47]等统计模型法。李萍等^[48]在对黄河三角洲土壤含水量进行估测研究时,利用多元逐步线性回归方法对土壤反射光谱数据进行 4 种波段的组合处理,建立了基于多种波段组合光谱参量的土壤含水量估测模型,其效果明显优于单一波段组合的形式。向红英等^[49]对南疆滴灌模式下的棉田土壤进行试验分析并利用偏最小二乘回归的方法,分别构建了不同土层含水量的反演模型,结果发现,利用反射率倒数对数所建立的模型对 0~30 cm 处土层与利用反射率对数所建立的模型对 0~10 cm 处土层含水量有较强的预测能力。统计模型法适用范围有限且空间移植性较差,对物理机理的认识不够完善;而机理模型法能够更好地表述地表属性和地表二向反射分布特征的关系,从而构建相关模型。程街亮等^[50]通过 Hapke 模型较好地模拟了实测的土壤二向反射率,并发现随着土壤含水量减少其单次散射反照率呈现出增大的趋势;随着土壤含水量的增加,特别是在 1 450、1 950、2 200 nm 波段处,单次散射反照率曲线中水分吸收峰

的深度和宽度都明显增大。

2.2.3 土壤重金属含量。目前通过高光谱遥感技术进行土壤重金属含量预测常用方法有多元线性回归法^[51]、偏最小二乘回归法^[52]、人工神经网络^[53]、支持向量机^[54]等,这些方法在特定的研究区均取得了较好的效果。张秋霞等^[52]利用偏最小二乘回归的方法,以经过数学变换处理后的特征光谱波段作为自变量,建立了区域土壤重金属反演模型,并根据经不同数学变换处理后的光谱特征,分别找出不同金属元素的最佳反演模型。由此可见,对于土壤中重金属元素种类、不同类型的土壤,虽然其反演方法都基本一致,但所建立的反演模型并不一定相同。由于土壤光谱特征是土壤属性特征的综合反映,土壤并不是均质的,且重金属元素在土壤中的空间分布比较复杂,具有高度的空间异质性。因此,以上方法目前在特定的研究区虽然取得一定的成果,但所建立的模型适用性极差。江振蓝等^[55]根据重金属元素与光谱变量间空间非平稳性关系,利用 GWR 模型对土壤重金属含量进行预测,并与 OLS 模型相比较,结果显示对于空间非平稳性的 Cr、Cu、Zn、Pb 等元素,GWR 模型预测精度明显高于 OLS 模型,而对于 Cd 和 Ni 等不具有显著空间异质性的金属元素,2 种模型预测精度差异则不明显。

2.2.4 土壤质地。目前,通过反射光谱数据来进行土壤质地的预测,学者们大多采用多元逐步回归法、偏最小二乘回归法和 BP 神经网络等方法。张娜等^[56]利用一元线性回归、逐步多元回归以及 BP 人工神经网络 3 种方法建立土壤光谱反射率与土壤砂粒、粉粒之间的预测模型,其结果显示,预测精度 BP 人工神经网络>逐步多元回归>一元线性回归。在王德彩等^[57]基于 Vis-NIR 光谱的土壤质地预测研究中,结果得出了同样结论,通过 BP 人工神经网络所建立的预测模型精度要远优于多元逐步回归。由于土壤质地与其反射光谱之间存在非常复杂的关系,一些常规的回归模型难以直接体现出这种关系,从而在一定程度上直接影响土壤质地预测精度的提高。因此,对于土壤质地预测模型的研究还需要进一步的挖掘。

3 问题与展望

3.1 存在的问题 通过已有研究发现,高光谱遥感技术已在土壤研究中得到了广泛的研究与应用,但仍有一些问题需要做进一步的研究。① 在研究方法上,目前学者通过高光谱定量反演土壤相关信息的研究多是基于室内测定土壤反射光谱,然后结合实测土壤属性信息,建立相关模型进行分析,鲜有利用高光谱遥感图像进行反演的研究。由于土壤是矿物质、水分、有机质等物质组合而成的有机整体,其组成成分之间相互影响、相互作用,因此其光谱反射率也是土壤所有属性的综合体现,如何更为准确地提取出土壤中各成分信息,目前尚未有好的方法。② 在时空尺度上,目前的土壤研究中,学者主要针对某一特定区域、同一时段上的土壤信息提取,而对于同一区域不同时间段的土壤演化特征及区域性土壤环境演化的研究鲜见报道。在土壤光谱研究中,学者们都采用统计分析的方法构建土壤各信息的反演模型,虽然在

各自的研究区能够取得较好的效果,但其移植性差、适用范围受限,难以在大区域的土壤研究中得到推广。

3.2 展望 目前高光谱遥感技术已经成功应用于土壤信息各研究领域中,为快速、实时、准确获得土壤信息提供了技术与理论的支持。利用反射光谱数据反演土壤信息已成为研究热点,建模的方法也越来越丰富。建模的方法决定了土壤信息反演精度,通过对现有模型的对比分析、改进优化以及根据不同需要创建新的模型已成为现在土壤研究的发展趋势。基于此,对未来的发展有以下展望:

(1) 未来高光谱数据的存储方式将会以更方便快捷被学者加以应用,土壤反射光谱数据的处理方式也会不断地优化改进,研究者将会获得质量更高、使用更方便、共享性更强的光谱数据。

(2) 随着学者们对土壤信息提取精度的追求,多角度遥感技术将会在土壤研究中广泛应用,建模的方法也会随之被优化改进,使得模型具有适用性强、移植性高、实用价值突出等优势。

(3) 科学管理、统一标准,建立光谱信息库。同时还应对不同类型、不同区域的土壤建立针对性的专一光谱数据库,以便于光谱数据实时共享,提高工作效率。

参考文献

- [1] 陈文倩,丁建丽,谭娇,等.干旱区绿洲植被高光谱与浅层土壤含水量拟合研究[J].农业机械学报,2017,48(12):229-236.
- [2] 徐彬彬.土壤剖面的反射光谱研究[J].土壤,2000(6):281-287.
- [3] 徐金鸿,徐瑞松,夏斌,等.土壤遥感监测研究进展[J].水土保持研究,2006,13(2):17-20.
- [4] 魏娜,姚艳敏,陈佑启.高光谱遥感土壤质量信息监测研究进展[J].中国农学通报,2008,24(10):491-496.
- [5] 吴良超,刘晓,高佩玲.高光谱遥感在土壤研究中的应用[J].安徽农业科学,2013,41(2):581-582,598.
- [6] 童庆禧,张兵,郑兰芬.高光谱遥感:原理、技术与应用[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [7] 浦瑞良,官鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [8] VINCENT R K.Fundamentals of geological and environmental remote sensing[M].New York:Prentice Hall,1977:1-366.
- [9] 杨国鹏,余旭初,冯伍法,等.高光谱遥感技术的发展与应用现状[J].测绘通报,2008(10):1-4.
- [10] BOVENSMANN H,BURROWS J P,BUCHWITZ M,et al.Sciamachy:Mission objectives and measurement modes[J].J Atmos Sci,1999,56(2):127-150.
- [11] SHIMODA H.Overview of Japanese Earth observation programe[C].SPIE,2009.
- [12] 童庆禧,张兵,张立福.中国高光谱遥感的前沿进展[J].遥感学报,2016,20(5):689-707.
- [13] 张卡,盛业华,张书毕.遥感新技术的若干进展及其应用[J].遥感信息,2004(2):58-62.
- [14] 杨国鹏,余旭初,冯伍法,等.高光谱遥感技术的发展与应用现状[J].测绘通报,2008(10):1-4.
- [15] 路威.面向目标探测的高光谱影像特征提取与分类技术研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2005.
- [16] 余旭初,冯伍法,林丽霞.高光谱——遥感测绘的新机遇[J].测绘科学技术学报,2006,23(2):101-105.
- [17] O'NEAL A M.The effect of moisture on the color of certain Iowa soils[J].American soil survey association bulletin,1927(B8):158-174.
- [18] 方少文,杨梅花,赵小敏,等.红壤区土壤有机质光谱特征与定量估算:以江西省吉安县为例[J].土壤学报,2014,51(5):1003-1010.
- [19] ANNE N J P,ABD-ELRAHMAN A H,LEWIS D B,et al.Modeling soil parameters using hyperspectral image reflectance insubtropical coastal wetlands[J].International journal of applied earth observation and geoinformation,2014,33(11):47-56.
- [20] 王祥峰,蒙继华.基于HJ-1卫星的农田土壤有机质含量监测[J].农业

- 工程学报,2014,30(8):101-108.
- [21] LIU S L,AN N N,YANG J J,et al.Prediction of soil organic matter variability associated with different land use types in mountainous landscape in southwestern Yunnan province, China[J].Catena,2015,133(10):137-144.
- [22] LIU F,ROSSITER D G,SONG X D,et al.A similarity-based method for three-dimensional prediction of soil organic matter concentration[J].Geoderma,2015,263(1):254-263.
- [23] 李超,刘兆刚,岳树峰,等.基于激光雷达数据的森林表层土壤有机质空间格局反演[J].应用生态学报,2012,23(9):2451-2458.
- [24] 袁征,李希灿,于涛,等.高光谱土壤有机质估测模型对比研究[J].测绘科学,2014,39(5):117-120,164.
- [25] AL-ABBAS A H,SWAIN P H,BAUMGARDNER M F.Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils[J].Soil science,1972,114(6):477-485.
- [26] 韩兆迎,朱西存,刘庆,等.黄河三角洲土壤有机质含量的高光谱反演[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1545-1552.
- [27] 王玉华,杨小霞,王克如,等.新疆不同类型土壤有机质含量的高光谱监测[J].新疆农垦科技,2016,39(11):55-57.
- [28] 余凡,赵英时.ASAR和TM数据协同反演植被覆盖地表土壤水分的新方法[J].中国科学:地球科学,2011,41(4):532-540.
- [29] 魏娜.土壤含水量高光谱遥感监测方法研究[D].北京:中国农业科学院,2009.
- [30] 李晨,张国伟,周治国,等.滨海盐土土壤水分的高光谱参数及估测模型[J].应用生态学报,2016,27(2):525-531.
- [31] 刘洋,丁潇,刘焕军,等.黑土土壤水分反射光谱特征定量分析与预测[J].土壤学报,2014,51(5):1021-1026.
- [32] PINHEIRO É E M,CEDDIA M B,CLINGENSMITH C M,et al.Prediction of soil physical and chemical properties by visible and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy in the central amazon[J].Remote sensing,2017,9(4):1-22.
- [33] GANNOUNI S,REBAI N,ABDELJAOUED S.A spectroscopic approach to assess heavy metals contents of the mine waste of Jalta and Bougrine in the North of Tunisia[J].Journal of geographic information system,2012,4(3):242-253.
- [34] 程先锋,宋婷婷,陈玉,等.滇西兰坪铅锌矿区土壤重金属含量的高光谱反演分析[J].岩石矿物学杂志,2017,36(1):60-69.
- [35] 杨雪红.土壤粒径对土壤光谱特征的影响[J].科技信息,2010(25):390-391,154.
- [36] BOWERS S A,HANKS R J.Reflectance of radiant energy from soils[J].Soil science,1965,100(2):130-138.
- [37] 李春蕾,许端阳,陈蜀江.基于高光谱遥感的新疆北疆地区土壤砂粒含量反演研究[J].干旱区地理,2012,35(3):473-478.
- [38] 马创,申广荣,王紫君,等.不同粒径土壤的光谱特征差异分析[J].土壤通报,2015,46(2):292-298.
- [39] 谭晖,张倩倩,曹茜,等.基于粒子群优化支持向量机的矿区土壤有机质含量高光谱反演[J].地球科学:中国地质大学学报,2015,40(8):1339-1345.
- [40] HUMMEL J W,SUDDUTH K A,HOLLINGER S E.Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor[J].Computers and electronics in agriculture,2001,32(2):149-165.
- [41] 李胜男,曹萌萌,李盛楠,等.黑土典型区有机质高光谱预测模型[J].国土与自然资源研究,2016(4):73-76.
- [42] 叶勤,姜雪芹,李西灿,等.基于高光谱数据的土壤有机质含量反演模型比较[J].农业机械学报,2017,48(3):164-172.
- [43] VISCARRA ROSSEL R A,BUI E N,CARITAT P,et al.Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible-near-infrared reflectance spectra[J].Journal of geophysical research,2010,115:1-13.
- [44] 李萍.黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[D].泰安:山东农业大学,2016.
- [45] 马明德,马学娟,谢应忠,等.宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J].生态学报,2014,34(3):682-689.
- [46] 汤娜,张新乐,刘焕军,等.土壤有机质与水分反射光谱响应特征综合评价模拟[J].土壤通报,2013,44(1):72-76.
- [47] PENJ J,SHEN H,HE S W,et al.Soil moisture retrieving using hyperspectral data with the application of wavelet analysis[J].Environ Earth Sci,2013,69(1):279-288.
- [48] 李萍,赵庚星,高明秀,等.黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[J].土壤学报,2015,52(6):1262-1272.

表 1 密度对郑单 958 产量性状的影响
Table 1 Effects of density on yield characters of Zhengdan 958

处理 Treatment	穗粗 Ear diameter cm	穗长 Ear length cm	穗行数 Ear row number//行	行粒数 Kernels per row 粒	出籽率 Shelling percentage %	百粒重 100-seed weight g	产量 Yield kg/hm ²
D ₁ (5.25 万株/hm ²)	4.99±0.12 a	16.94±1.43 a	14.53±0.03 a	34.82±1.22 a	0.85±0.17 ac	37.75±0.84 a	8 574.43±33.75 b
D ₂ (6.00 万株/hm ²)	4.94±0.04 ac	16.30±0.40 ab	14.75±0.28 a	32.42±1.38 b	0.87±0.17 a	36.59±1.13 b	9 260.43±179.71 a
D ₃ (6.75 万株/hm ²)	4.51±0.14 b	15.03±0.31 b	14.73±0.21 a	31.42±0.85 b	0.82±0.05 b	34.42±0.76 c	8 726.23±137.94 b

注:同列不同字母分别表示处理间差异达 0.05 水平。
Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

3.2 种植密度与产量及产量性状的变化关系 该试验表明,在一定程度上玉米种植密度增加能增加单位面积的群体数量,从而使产量增加;但产量不是随着密度增加无限制的增加,密度增加到一定程度后会影响到玉米单株的产量性状,包括百粒重、出籽率、行粒数、穗长、穗粗都有不同幅度降低。当群体数量优势大于单株的产量优势时,表现为增产;当密度对单株产量性状的影响超过群体优势时,表现为减产。该试验中郑单 958 的最高产量出现在密度为 6.00 万株/hm²,此时产量为 9 260.43 kg/hm²。

4 结论

该试验结果表明,密度是玉米胁迫因子之一,可以导致叶绿素荧光的系列参数发生改变。试验中 3 种处理下全生育期 *F_v* 均在升高,D₃ 处理增幅最大,表明 D₃ 处理下光系统Ⅱ反应中心活性降低,光系统Ⅱ受到的胁迫更严重;*F_v*/*F_m* D₃ 处理下降幅度最大,说明 D₃ 处理下玉米受密度胁迫最严重;*Y(Ⅱ)* 值 D₂ 处理下最大,说明种植密度 6.00 万株/hm² 更有利于光合作用,光合效率最高。该试验中郑单 958 的最高产量出现在 6.00 万株/hm²,表明在该密度下更容易获得高产,产量性状表现更有优势。

参考文献

[1] 刘武仁,刘凤成,冯艳春,等.玉米不同密度的生理指标研究[J].玉米科学,2004,12(22):82-83,87.
[2] 段民孝.从农大 108 和郑单 958 中得到的玉米育种启示[J].玉米科学,2005,13(4):49-52.
[49] 向红英,牛建龙,彭杰,等.棉田土壤水分的高光谱定量遥感模型[J].土壤通报,2016,47(2):272-277.
[50] 程街亮,纪文君,周银,等.土壤二向反射特性及水分含量对其影响研究[J].土壤学报,2011,48(2):255-262.
[51] SONG L, JIAN J, TAN D J, et al. Estimate of heavy metals in soil and streams using combined geochemistry and field spectroscopy in Wan-sheng mining area, Chongqing, China[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2015, 34: 1-9.
[52] 张秋霞,张合兵,刘文锴,等.高标准基本农田建设区域土壤重金属含量的高光谱反演[J].农业工程学报,2017,33(12):230-239.
[53] TAN K, YE Y Y, CAO Q, et al. Estimation of arsenic contamination in reclaimed agricultural soils using reflectance spectroscopy and ANFIS model

[3] 王福亮.黑龙江省玉米栽培技术发展及进步[J].黑龙江农业科学,2010(10):155-156.
[4] 董树亭,胡昌浩,高荣岐,等.夏玉米高产群体呼吸速率与光合特性关系的研究[J].玉米科学,1994,2(3):61-65.
[5] BORRÁS L, MADDONNI G A, OTEGUI M E. Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kernel set effects[J]. Field Crops Res, 2003, 82(1):13-26.
[6] 王群瑛,胡昌浩.玉米不同叶位叶片叶绿体超微结构与光合性能的研究[J].植物学报,1988,30(2):146-150.
[7] ANDRADE F H, VEGA C, UHART S, et al. Kernel number determination in maize[J]. Crop Sci, 1999, 39(2):453-459.
[8] 柴胜丰,韦霄,史艳财,等.强光胁迫对濒危植物金花茶幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响[J].植物研究,2012,32(2):159-164.
[9] 刘明,齐华,张振平,等.不同环境因子对玉米叶绿素荧光特性的影响[J].华北农学报,2010,25(6):198-204.
[10] 孙璐,周宇飞,李丰先,等.盐胁迫对高粱幼苗光合作用和荧光特性的影响[J].中国农业科学,2012,45(16):3265-3272.
[11] GENTY B, BRIANTAIS J M, BAKER N R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence[J]. Biochimica et biophysica acta, 1989, 990(1):87-92.
[12] 罗俊,张木清,吕建林,等.水分胁迫对不同甘蔗品种叶绿素荧光 a 荧光动力学的的影响[J].福建农业大学学报,2000,29(1):18-22.
[13] GOVINDJEE. A role for a light-harvesting antenna complex of photosystem II in photo protection[J]. The plant cell, 2002, 14(8):1663-1668.
[14] 王可玢,许春辉,赵福洪,等.水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响[J].生物物理学报,1997,13(2):273-278.
[15] BORRELL A K, HAMMER G L, HENZELL R G. Does maintaining green leaf area in sorghum improve yield under drought? II. Dry matter production and yield[J]. Crop science, 2000, 40(4):1037-1048.
[16] 张雷明,上官周平,毛明策,等.长期施氮对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,2003,14(5):695-698.
[17] 许大全,张玉忠,张荣铨.植物光合作用的光抑制[J].植物生理学通讯,1992,28(4):237-243.

[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7: 2540-2546.
[54] STAZI S R, ANTONUCCI F, PALLOTTINO F, et al. Hyperspectral visible-near infrared determination of arsenic concentration in soil[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2014, 45(22):2911-2920.
[55] 江振蓝,杨玉盛,沙晋明. GWR 模型在土壤重金属高光谱预测中的应用[J].地理学报,2017,72(3):533-544.
[56] 张娜,张栋良,李立新,等.基于高光谱的区域土壤质地预测模型建立与评价:以河套灌区解放闸灌域为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):67-72.
[57] 王德彩,张俊辉.基于 Vis-NIR 光谱的土壤质地 BP 神经网络预测[J].天津农业科学,2015,21(8):6-9.

(上接第 21 页)