

彭晓伟, 张爱军, 杨晓楠, 等. 基于 WOS 的高光谱技术在农业方面应用的计量分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 239-249.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.029

基于 WOS 的高光谱技术在农业方面应用的计量分析

彭晓伟¹, 张爱军^{1,2}, 杨晓楠²

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省山区农业技术创新中心, 河北 保定 071001)

摘要: 利用高光谱技术可对作物在生长发育过程中出现的问题进行实时监控和处理, 从而实现精准施肥、精准施药及实时管理。为了解高光谱技术在农业领域中的利用状况, 利用 Web of Science 网站自带的数据分析功能以及 VOSviewer 可视化分析软件对 Web of Science 核心合集数据库中高光谱技术在农业领域中应用的发文数量与研究领域、主要发文国家(地区)、主要发文机构和研究学者、主要发文学术期刊、发文被引频次较多的文章、主要研究热点及其变化趋势等进行计量分析。结果表明, 高光谱技术在农业领域的应用受到的关注越来越多, 发文量呈现指数增长的趋势。发文量最高的 20 个国家中有 9 个是欧洲国家, 中国、美国对该领域的贡献最大。高光谱技术在农业领域应用研究的影响力最高的期刊为 Remote Sensing of Environment, 发文量最多的学者为浙江大学的 He Yong, 影响力最高的文章是“Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review”。高光谱技术在农业领域应用的研究趋势主要涉及数据采集、分析方式的更新及作物对光谱的作用机制。

关键词: 高光谱技术; 农业领域; 计量分析

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0239-11

Quantitative analysis of hyperspectral technology application in agriculture based on Web of Science (WOS)

PENG Xiao-wei¹, ZHANG Ai-jun^{1,2}, YANG Xiao-nan²

(1. College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2. Agricultural Technology Innovation Center in Mountainous Area of Hebei Province, Baoding 071001, China)

Abstract: Hyperspectral technology can be used to monitor and deal with the problems in the process of crop growth and development in real time, so as to realize precise fertilization, precise application and real-time management. In order to understand the utilization of hyperspectral technology in the field of agriculture, the data analysis function of Web of Science system and VOSviewer visualization analysis software were used to quantitatively analyze the number and research field of hyperspectral technology in the core collection database of Web of Science, the main countries (regions), the main institutions and scholars, the main academic journals, the articles with more citations, the main research hotspots and their trends. The results showed that the application of hyperspectral technology in agriculture had attracted more and more attention, and the number of publications exhibited an exponential growth trend. Nine of the 20 countries with the highest number of publications were European countries, but China and the United States had the largest contribution to this field. The most influential journal of hyperspectral technology in agricultural applications was Remote Sensing of Environment, and HE Y of Zhejiang University was the scholar with the largest number of publications. The most influential article was ‘Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of

收稿日期: 2021-05-12

基金项目: 河北省重点研发计划项目(19226421D)

作者简介: 彭晓伟(1997-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事高光谱技术在农业方面的应用研究。(E-mail)

1187846870@qq.com

通讯作者: 张爱军, (E-mail) xm70526@163.com

NIR spectroscopy: a review’. The development trend of hyperspectral technology in agriculture mainly involves the updating of data collection and analysis methods and the action mechanism of crop on spectrum.

Key words: hyperspectral technology; agricultural field; quantitative analysis

高光谱遥感(Hyperspectral remote sensing),又称成像光谱遥感,是以测谱学为基础发展起来的遥感前沿技术,它利用很窄(一般波段宽度 $<10\text{ nm}$)的电磁波段从感兴趣的物体上获取有关数据,高光谱分辨率一般可达到 $10^{-2}\lambda$ 数量级,可产生1条完整的光谱曲线^[1],并且高光谱遥感具有谱像合一的技术,使图像可以同时具有空间、辐射和波谱信息。由于遥感技术具有获取速度快、信息量大、覆盖面广的特点^[2-4],因此被广泛应用在农业遥感监测中^[5-6]。

高光谱技术可以非破坏性地获取某地块的地物反射信息,从而对各种作物的生理生化参数进行监测^[7]。在作物种子鉴别方面,该技术可鉴别作物种子类别^[8]与真伪,并可检测种子活力^[9]及品质^[9],从而挑选出活力较高的种子进行农业生产活动。在作物测量方面,高光谱技术可用于估测作物叶绿素含量^[10]、叶面积指数^[11]、光利用效率^[12]及氮含量^[13]等生理特性及识别作物是否染病^[14]、是否缺乏营养元素^[15]。而在土壤性质测量方面,高光谱技术可用于估测土壤水盐状况^[16]及测定土壤重金属含量^[17]、土壤有机质含量^[18]与营养元素含量^[19]。

在种子鉴别及判断作物是否染病方面,高光谱技术可利用支持向量机、逐步判别分析法、Ada-Boost 算法等方法进行操作。在用高光谱技术估测各项生理指标时,常见的建模方法主要有以下几个:(1)基于单变量模型,例如基于敏感波段及光谱指数建立的二次模型、指数模型、对数模型、多项式模型和乘幂模型。(2)基于多变量模型,主要是利用多个敏感波段及光谱指数建立的偏最小二次回归模型及多元回归模型等。(3)深度学习算法,利用 BP 神经网络、RBF 神经网络、支持向量机回归等算法模型。

目前关于高光谱技术在农业上应用的研究很多,但是农学背景下的文献计量学分析是稀缺的^[20-21]。本研究通过检索 Web of Science(WOS)核心合集数据库 30 年(1990–2020 年)内的所有期刊,分析 30 年内高光谱技术在农业上应用的论文发文量、主要发文国家和发文作者之间的合作关系及该领域的研究热点和研究趋势。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中的文献计量数据来源于美国汤森路透

公司(Thomson Reuters)的 WOS 核心合集数据库,该数据库被广泛应用于文献计量学研究中^[22]。文献检索的主题词高光谱农业设置为“hyperspectral” AND “soil” OR “hyperspectral” AND “agriculture” OR “hyperspectral” AND “crop”。设置检索时间为 1990–2020 年,所有文献的检索日期截至 2020 年 12 月 31 日,最终得到的文献数量是 4 806 篇。

1.2 研究方法

利用 WOS 核心合集自带的分析工具对 1990–2020 年发表的 4 806 篇文献从发文数量与研究领域、发文单位所在的主要国家(地区)、发文的主要机构和研究者、发文的主要学术期刊、被引量较多的文章、主要研究热点及其变化趋势进行分析。通过 VOSviewer 科研合作网络分析主要发文国家/地区(Countries)、机构(Organizations)之间的合作关系及关键词(Key word)的共线关系,并分析节点间的连接总强度(Total link strength, TLS)。将 WOS 检索的目标文献数据分别保存为文本格式(.txt),进行数据清洗后导入相关软件进行可视化图谱的绘制。利用 Hirsch^[23]定义的 h 指数评估研究人员的学术产出数量与学术产出水平。例如,作者有 20 篇论文(著作)等被引用 20 次,这时 h 指数为 20。本研究结果显示的 h 指数仅指 WOS 核心合集数据库中的引文,如果考虑其他数据库(例如 Scopus 和 Google Scholar),则可能获得不同的 h 指数。

2 结果与分析

2.1 历年发文量及研究领域分析

在过去的 30 年中,根据上文对 WOS 中文献的搜索策略,找到 4 806 篇关于高光谱技术在农业中应用的文献,对文献进行筛选,共选出 4 761 篇文献。直到 2020 年 12 月 31 号,文献的总被引频次为 139 027 次, h 指数为 147。由于 1990–1996 年未找到相关文献,故本研究对 1996–2020 年的文献发表量进行分析(图 1),可以看出,高光谱技术在农业中的应用呈现指数增长趋势($R^2=0.937\ 1$),发文量从 1996 年的 1 篇到 2019 年的 660 篇,从 2003 年开始,发文量明显呈现爆发性增长趋势。

利用 WOS 核心合集数据库自带的分析工具得到各学科的发文数量及 h 指数,由表 1 可以看出,高光谱技术在农业中的应用涉及多个学科,其中在遥感学、影像科学与摄影技术、环境科学及农学等学科中

发文量最多,占总发文量的 65.76%,在遥感学的 h 指数最高。值得注意的是,在光谱学领域的发文数量较少(占比 4.70%), h 指数较低,进一步分析发现,通过

植物的反射光谱特性分析可以得出植物生理参数的机制,因此在实际研究中可加强光谱学与农学的交叉研究,从而促进高光谱学和农学的协同发展。

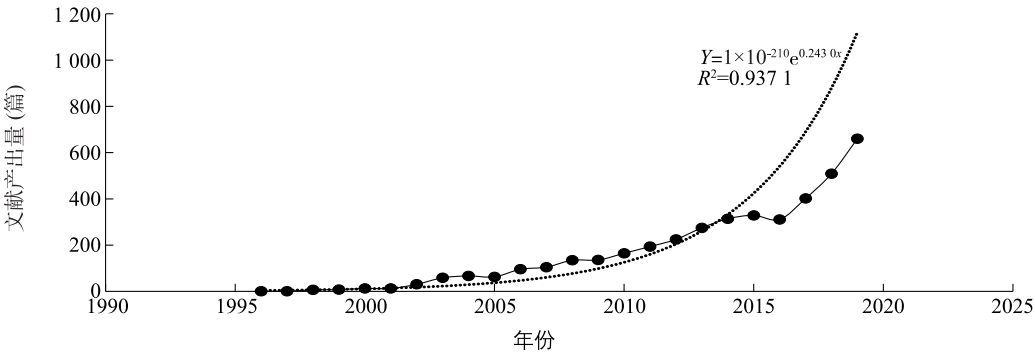


图 1 1996–2020 年文献产出量
Fig.1 Literature output from 1996 to 2020

表 1 发文数量与 h 指数排名前 10 的学科
Table 1 Top ten disciplines in terms of number of publications and h index

学科分类	发文数量(篇)	h 指数
遥感学	1 531	107
影像科学与摄影技术	1 329	105
环境科学	1 132	92
农学	1 114	83
地质学	683	54
工程学	547	65
食品科学	399	60
光谱学	365	21
化学	364	37
计算机科学	301	44

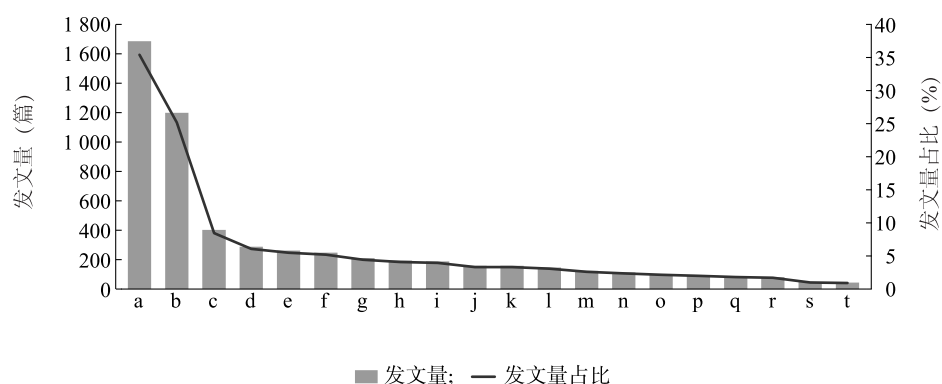
2.2 主要发文国家(地区)

如图 2 所示,美国(h 指数为 98)和中国(h 指数为 62)的发文量占总发文量的 60.54%,其中中国的发文量最大(占比为 35.31%),在 20 个发文量较多的国家中,有 9 个来自欧洲,其中西班牙(h 指数为 56)是欧洲中对本研究贡献率(以 h 指数计)最高的国家,发文量占总发文量的 6.09%,而在非洲、大洋洲和南美洲,南非(h 指数为 38)、澳大利亚(h 指数为 43)和巴西(h 指数为 27)是少数发表过高光谱技术在农业方面应用研究论文的国家,其发文量分别占总发文量的 2.17%、5.18%和 2.32%。根据 VOSviewer 的总联系强度可以看出,

美国(TLS 值为 752)、中国(TLS 值为 575)、德国(TLS 值为 376)和西班牙(TLS 值为 294)等国家在农业高光谱领域的国际合作关系密切。由图 3 可以看出,中国和美国间的连线最为密集,并与德国、加拿大、法国和澳大利亚等国家间均有合作。

2.3 主要发文机构和人员

由表 2 可以看出,在发文量较多的 10 个机构中,中国科学院的发文量最多,有 6 个中国大学/研究院的发文量排名在 10 以内,包括中国科学院(h 指数为 32)、浙江大学(h 指数为 34)、北京市农林科学院(h 指数为 26)、中国科学院大学(h 指数为 21)、中国科学院遥感与数字地球研究所(h 指数为 20)、中国农业大学(h 指数为 25)。由表 3 可以看出,浙江大学的 He Yong 发文影响力较大,发文 105 篇(h 指数为 26),占浙江大学总发文量的 50%,占该领域总发文量的 2.237%,该学者的主要研究方向为农业遥感与信息、数字农业与精细农业、农业物联网技术等。在发文量排名前 10 的机构中,美国农业部的 h 指数最高,为 62,其中 Moon S. Kim 的发文量排名第 3(h 指数为 24),论文被引用 2 389 次,说明美国农业部发表文章的影响力较大。来自西班牙的 Pablo J. Zarco-Tejada 的论文被引用次数最多,达到 6 701 次,其在高光谱农业方面的影响力最高, h 指数为 31。虽然爱尔兰的都柏林大学、中国的南京农业大学以及韩国的忠南大学均未被列入发文量排名前 10 的机构,但仍有学者发表过相关优秀论文。



a: 中国; b: 美国; c: 德国; d: 西班牙; e: 加拿大; f: 澳大利亚; g: 意大利; h: 印度; i: 法国; j: 英国; k: 比利时; l: 荷兰; m: 日本; n: 巴西; o: 南非; p: 以色列; q: 韩国; r: 爱尔兰; s: 伊朗; t: 瑞士。

图2 论文产出国(地区)及产出占比

Fig.2 Output country and output proportion

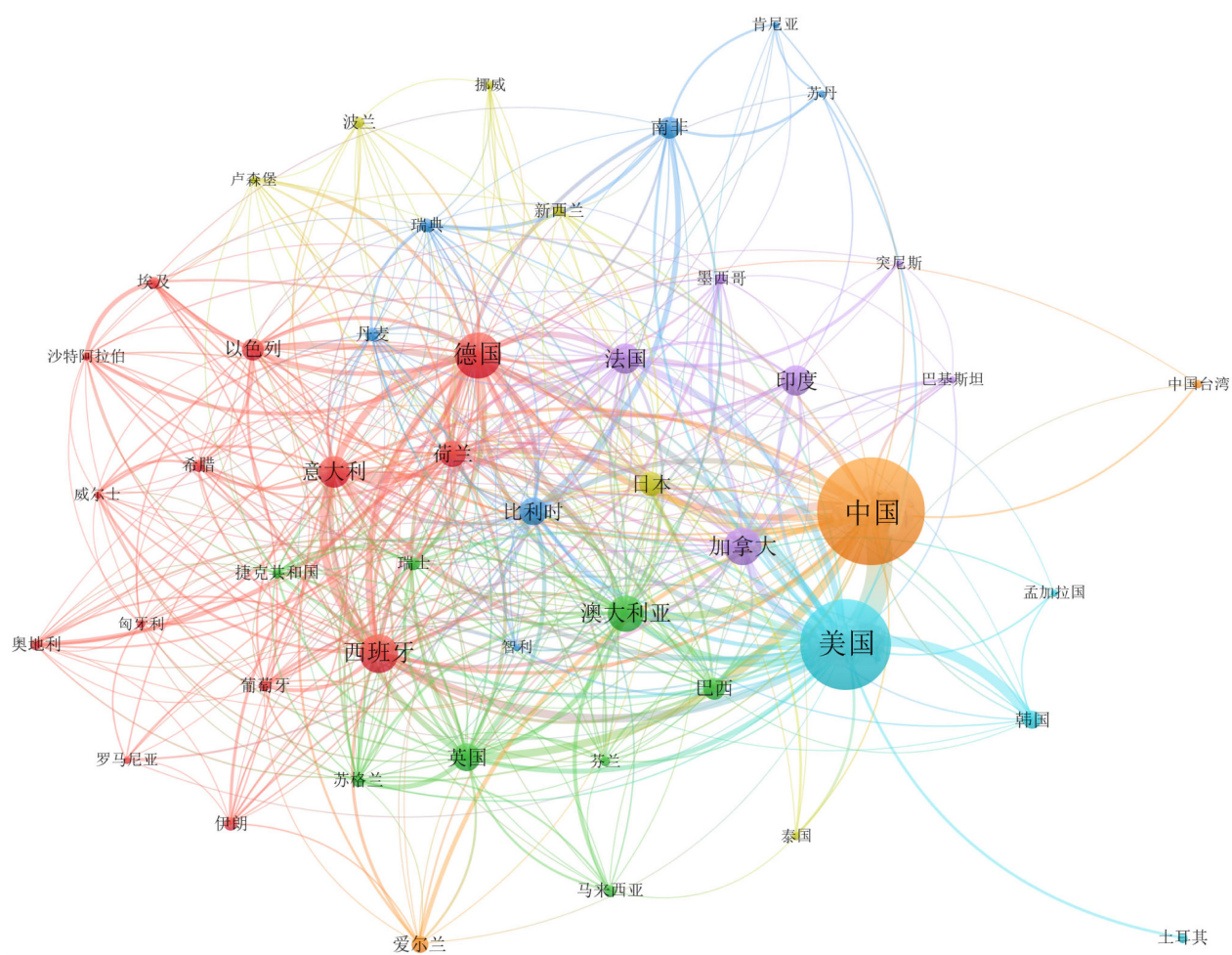


图3 论文产出国(地区)之间的合作关系

Fig.3 Cooperative relations among the output countries of the paper

表 2 高光谱技术在农业领域应用研究发文量排名前 10 的研究机构

Table 2 Research institutions with top ten publications in the field of hyperspectral applications in agriculture

研究机构	所属国家	发文量(篇)	发文量占比(%)	<i>h</i> 指数
中国科学院 (Chinese Academy of Sciences)	中国	343	7.309	32
美国农业部 (United States Department of Agriculture)	美国	314	6.691	62
浙江大学 (Zhejiang University)	中国	210	4.475	34
北京市农林科学院 (Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences)	中国	139	2.962	26
加利福尼亚大学 (University of California)	美国	132	2.813	42
亥姆霍兹联合会 (Helmholtz Association of German Research Centres)	德国	112	2.387	32
中国科学院大学 (University of Chinese Academy of Sciences)	中国	107	2.280	21
中国科学院遥感与数字地球研究所 (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences)	中国	97	2.067	20
西班牙国家研究理事会 (Consejo Superior de Investigaciones Cientificas)	西班牙	96	2.046	33
中国农业大学 (China Agricultural University)	中国	85	1.811	25

表 3 高光谱技术在农业领域应用研究发文量排名前 10 的作者

Table 3 Scholars with top ten publications in the field of hyperspectral applications in agriculture

作者	单位	所属国家	发文量(篇)	被引用频次(次)	发文量占比(%)	<i>h</i> 指数
He Yong	浙江大学	中国	105	2 014	2.237	26
Huang Wenjiang	中国科学院	中国	78	1 349	1.662	18
Moon S. Kim	美国农业部	美国	66	2 389	1.406	24
DaWen Sun	都柏林大学	爱尔兰	51	2 107	1.087	25
Yang Guijun	北京农林科学院	中国	50	882	1.065	16
Pablo J. Zarco-Tejada	西班牙国家研究理事会	西班牙	49	6 701	1.044	31
Zhang Chu	浙江大学	中国	49	824	1.044	15
Wang Jihua	南京农业大学	中国	46	977	0.980	15
Zhu Yan	北京农林科学院	中国	46	1 108	0.980	19
Byoung-Kwan Cho	忠南大学	韩国	41	763	0.874	17

本研究利用 VOSviewer 分析不同机构之间在农业高光谱领域的合作关系,由图 4 可以看出,中国科学院(*TLS* 值为 284)和浙江大学(*TLS* 值为 113)与各主要论文产出研究机构间的合作关系密切,右下集群(黄色集群)以中国科学院、中国科学院大学(*TLS* 值为 106)、北京师范大学为主(*TLS* 值为 61),而右上集群(绿色集群)以浙江大学、北京农林科学院为主(*TLS* 值为 54),左上集群(蓝色集群)是以美国农业部(*TLS* 值为 96)、加利福尼亚大学(*TLS* 值为 37)、佛罗里达大学(*TLS* 值为 31)、美国航空航天局(*TLS* 值为 24)为主的美国机构,而左下集群(红色集群)则是以加拿大农业及农业食品部(*TLS* 值为 60)、西班牙国家研究理事会(*TLS* 值为 35)和加拿大曼尼托巴大学(*TLS* 值为 15)为主的欧洲和北美洲的洲际集群。

2.4 主要发文期刊和文章

通过分析 1990–2020 年的发文期刊可以看

出,发文量排名前 3 的期刊是 Remote Sensing(发文 393 篇)、Remote Sensing of Environment(发文 273 篇)和 Spectroscopy and Spectral Analysis(发文 257 篇),文章总被引次数排名前 3 的期刊为 Remote Sensing of Environment(被引 23 328 次)、Remote Sensing(被引 6 622 次)、International Journal of Remote Sensing(被引 6 098 次),文章的 *h* 指数排名前 3 的期刊是 Remote Sensing of Environment(*h* 指数为 82)、Remote Sensing(*h* 指数为 41)和 Computers and Electronics in Agriculture(*h* 指数为 40),农业高光谱领域发文期刊中影响因子排名前 3 的期刊为 Remote Sensing of Environment(9.085)、IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing(5.855)、International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation(4.650)(表 4)。

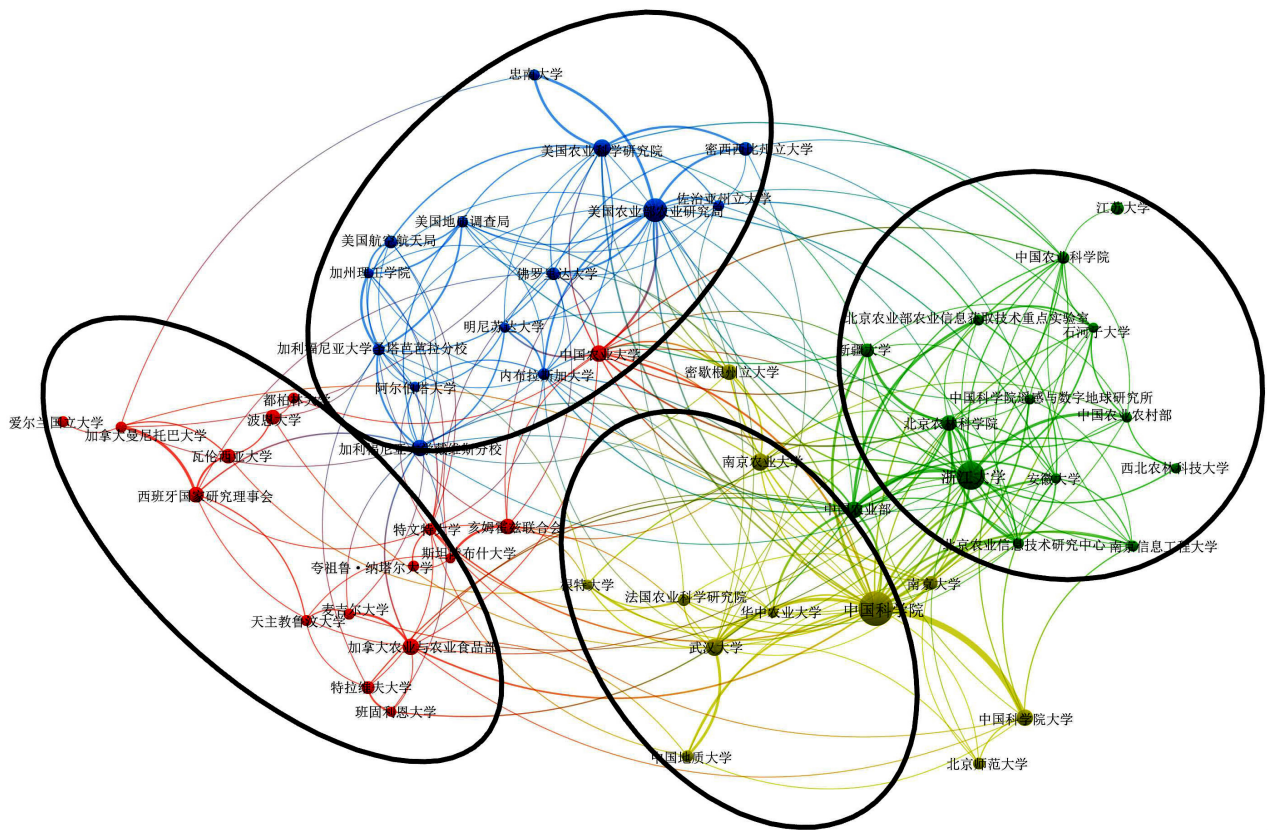


图 4 论文产出主要机构的共线性关系
Fig.4 Collinearity among main institutions of the paper output

表 4 高光谱技术在农业领域应用研究发文量排名 TOP 10 的期刊
Table 4 Journals with top ten publications in the field of hyperspectral applications in agriculture

期刊名称	发文量(篇)	影响因子	h 指数	总被引频次(次)
Remote Sensing	393	4.509	41	6 622
Remote Sensing of Environment	273	9.085	82	23 328
Spectroscopy and Spectral Analysis	257	0.452	12	934
International Journal of Remote Sensing	249	2.976	39	6 098
Computers and Electronics in Agriculture	204	3.858	40	5 626
Sensors	127	3.275	23	2 150
International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	99	4.650	30	3 296
Biosystems Engineering	93	3.215	27	2 797
Precision Agriculture	88	4.454	30	2 835
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	81	5.855	37	5 519

由表 5 可以看出,在被引频次排名前 10 的期刊中,发表在 Remote Sensing of Environment 上的文章有 5 篇,这些文章的研究方向均为高光谱技术在精准农业上的应用,有研究者利用高光谱技术对作物的叶绿素含量、叶面积指数、生物量及氮素含量进行了研究,研究内容涉及植被指数优化、估测模型的比较、估测算法的优化与更新等多个方面。发表在 Postharvest

Biology and Technology 上的文章作为总被引频次(1 185 次)和年均被引频次(91.15 次)最高的文章,探究了近红外光谱技术应用在果蔬品质方面的研究进展,比较了不同分光光度计的设计和测量原理及蔬菜组织的光吸收、散射特性。发表在 Precision Agriculture、Remote Sensing of Environment 上的文章则探究了无人机搭载光谱平台在农业上的应用趋势,提出

应用小型无人机替代传统高光谱卫星影像,从而实时分析作物生长状态,可为精准农业提供理论依据和技术支持。发表在 Science 上的 2 篇文章则探讨了高光谱技术在测量土壤性质方面的应用。

表 5 高光谱技术在农业领域应用研究被引频次排名 TOP 10 的文章

Table 5 Articles with top ten citation frequency in the field of hyperspectral applications in agriculture

文章题目	发表期刊	发表年份	年均被引频次 (次)	文章总被引频次 (次)
Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy; a review	Postharvest Biology and Technology	2007 年	91.15	1 185
Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies; modeling and validation in the context of precision agriculture	Remote Sensing of Environment	2004 年	71.75	1 148
integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture	Remote Sensing of Environment	2002 年	50.83	915
Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density	Remote Sensing of Environment	2001 年	41.68	792
The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture; a review	Precision Agriculture	2012 年	88.63	709
Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics	Remote Sensing of Environment	2000 年	35.45	709
Sulfates in martian layered terrains; the OMEGA/Mars Express view	Science	2005 年	46.93	704
Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars express observations	Science	2005 年	45.93	689
Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression	Remote Sensing of Environment	2003 年	39.82	677
Thermal and narrowband multispectral remote Sensing for Vegetation monitoring from an unmanned aerial Vehicle	IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	2009 年	58.27	641

2.5 关键词共线网络分析

对上述筛选的4 806篇文章的关键词进行共线性分析得出,高光谱技术在农业领域的应用研究可以划分为 4 个聚类,图 5 中不同颜色表示不同的聚类,其中第 1 个聚类(绿色集群)主要是高光谱技术在农业领域应用的方法研究,关键词为 Classification(分类)、Prediction(预测)、Regression(回归)、Identification(识别)、Selection(选择)、Nondestructive determination(无损测定)、Least-squares regression(最小二乘)、Machine vision(机器视觉)、Successive projections algorithm(连续投影算法)、Artificial neural-networks(人工神经网络)等;第 2 个聚类(蓝色集群)主要是高光谱技术应用于作物研究的趋势,主要关键词包括 Chlorophyll(叶绿素)、Vegetation index(植被指数)、Leaf(叶片)、Nitrogen(氮素)、Red edge(红边)、Canopy(冠层)、Yield(产量)、Wheat(小麦)、Corn(玉米)、Crop(作物)、Precision agriculture(精准农业)、Photosynthesis(光合作用)、Rice(水

稻)、Carotenoids(类胡萝卜素)等;第 3 个聚类(红色集群)主要是关于高光谱技术在农业领域中数据获取与数据分析的研究,主要关键词为 Image-analysis(图像分析)、Hyperspectral data(高光谱数据)、Hyperspectral imagery(高光谱影像)、Imaging spectroscopy(成像光谱)、Resolution(分辨率)、Extraction(提取)、AVIRIS data(AVIRIS 数据)、Accuracy(精度)、Airborne(机载)、MODIS data(MODIS 数据)、Sensors(传感器)、EO-1 Hyperion(EO-1 影像)、Satellite(卫星)、UAV(无人机);第 4 个聚类(黄色集群)主要是高光谱技术在农业领域应用的一些原理性研究,主要关键词包括 Hyperspectral vegetation indexes(高光谱植被指数)、Optical-properties(光学特性)、Band(波段)、Bidirectional reflectance(二向性反射)、Scattering(散射)、Light(光)、Leaf optical-properties(叶片光学特性)、Radiative-transfer models(辐射传输模型)、吸收(Absorption)、仿真(Simulation)。

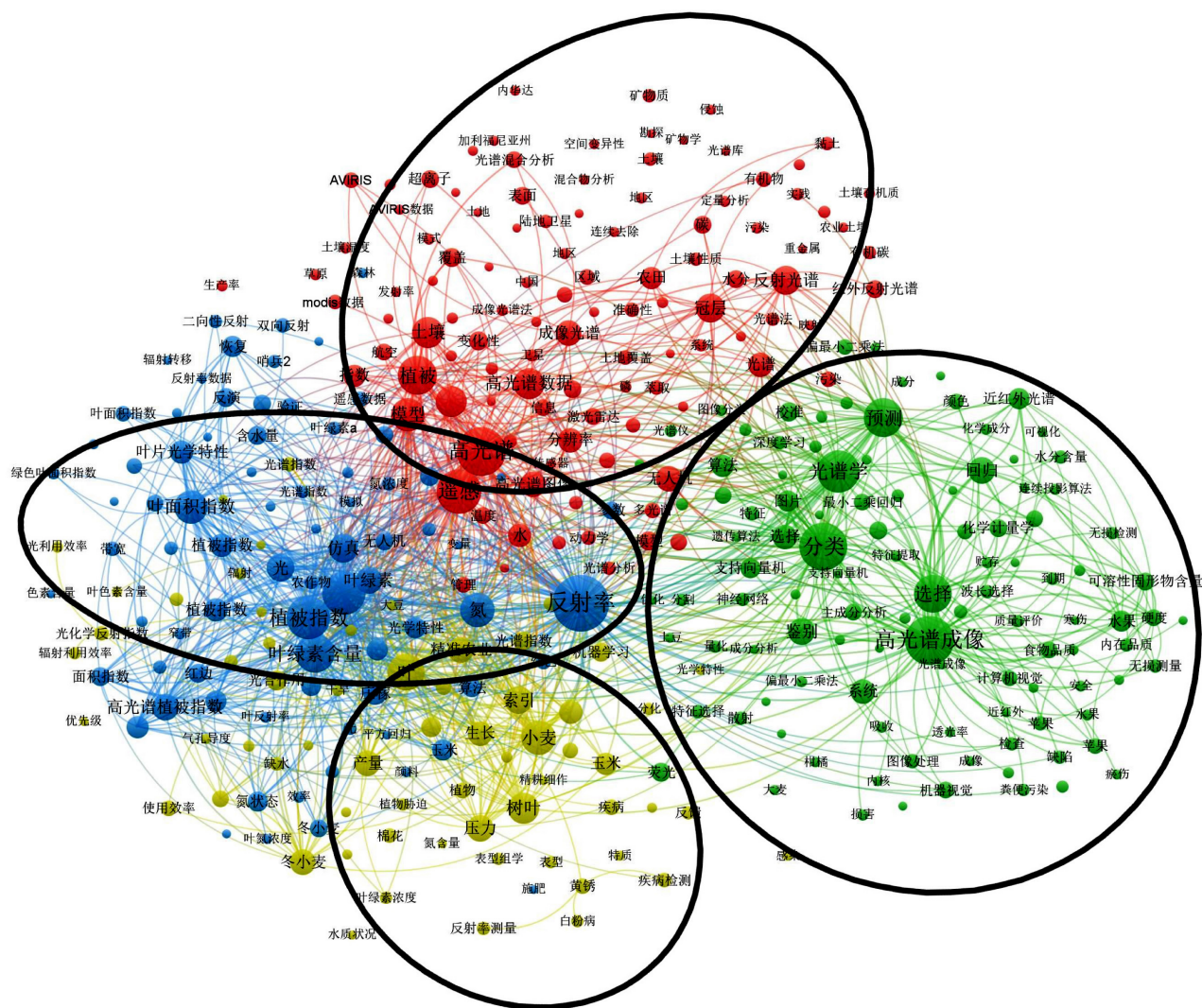


图 5 关键词共线性网络分析

Fig.5 Collinear network analysis of keywords

2.6 研究趋势

由图 6 可以看出,在 2013 年及以前,研究的主要趋势是探究敏感波段与估测目标间的相关关系,主要关键词为 Broad-band(带宽)、Transmittance(透射率)、Cover(覆盖)、Radiation-use efficiency(辐射利用效率)和 Red edge(红边),如美国农业部在 20 世纪六七十年代就已经获取了 400~2 400 nm 处于叶的光谱,并获得了较高精度^[24]。Gitelson 等^[25]对枫树、七叶树的树叶进行高光谱数据分析发现,光谱 700 nm 处的反射率对叶绿素浓度比较敏感。可以看出,由于受到技术的影响,上述研究主要针对光谱技术的理论性,为之后的研究提供了一定理论依据。2013–2014 年,Vegetation(植被)、Soil(土壤)、Chlo-

rophyll-A(叶绿素 A)、Forest(森林)、Corn(玉米)、Canopy reflectance(冠层反射率)等关键词出现的频率大大提高,如 Hunt 等^[26]利用光谱波段组合对作物冠层的叶绿素含量进行估测,得到了较优的模型。Lyu 等^[27]通过采集水稻光谱值并建立支持向量机模型,对水稻叶绿素含量进行估测,结果表明,对光谱值进行一阶微分处理的估测效果优于原始光谱。以上研究结果表明,相关研究方向从光谱理论层面转向了实际应用。2014–2015 年,关键词主要为 Discrimination(辨别)、Crop(作物)、Algorithm(算法)、Chlorophyll(叶绿素)、Biomass(生物量)、Yield(产量)、Spectroscopy(光谱)、Classification(分类)、Hyperspectral vegetation indexes(光谱植被指数),说

明研究者在估测作物农学参数的基础上扩展了研究类型,如产量估测、生物量估测,同时在研究方法上进行了创新,利用算法对光谱波段进行处理,从而实现对农学参数的估测与鉴别,如 Morier 等^[28]研究不同施氮水平下马铃薯的农学相关指标变化规律,利用高光谱反射率对其进行估测,结果表明,红边叶绿素指数 1 与马铃薯的氮含量、总产量高度相关。Li 等^[29]利用 DSSAT-CERES 作物模型与遥感数据进行整合,对冬小麦的产量进行估测,估测 R^2 、 $RMSE$ 分别达到了 0.698、0.726。2015–2016 年的关键词主要是 Resolution (分辨率)、Simulation (仿真)、Airborne (机载)、Imaging spectroscopy (成像光谱)、Band selection (波段选择)、Leaf optical-properties (叶片光学特性),说明这段时间高光谱数据的获取和分析研究进一步加深,开始向图谱合一的方向发展,研究者开始对图像精度有了进一步的要求,同时利用叶绿素等农学指标对不同波段的敏感性进行波段组合,以提高估测精度,如 Simko 等^[30]利用高光谱成像技术对真空包装的鲜切生菜的叶绿素含量进行测定,从而判别其是否腐烂,分类精度达到了 97%。2016–2017 年的主要关键词为 Fruit (水果)、Food

(食品)、Food quality (水果质量)、Least-squares regression (最小二乘回归)、Optimization (优化)、Performance (性能)、Computer vision (计算机视觉)、Successive projections algorithm (连续投影算法),高光谱技术在农业领域的应用开始向水果、食品方向逐渐扩展。Elmasry 等^[31]在 2016 年对高光谱成像技术应用于食品质量检测方面的研究进行综述,分析了不同图像采集、处理方法与检测、分类、量化及预测食品质量的过程,而研究方法开始大规模使用多元回归方程,对估测模型及分类模型的性能有了进一步的要求,同时在原有模型的基础上进行不断优化,以提高模型的预测精度。2017 年之后的关键词主要是 Powdery mildew (白粉病)、Drought (干旱)、Heavy-metals (重金属)、Random forest (随机森林)、UAV (无人机),说明高光谱技术在农业上的应用逐渐从农学参数的估测拓展为病虫害的识别及极端情况的识别,从而为进行精准农业提供技术支持,而研究方法和数据获取手段也变为机器识别算法和利用无人机获取高光谱数据,说明高光谱技术与计算机技术及农业的深度结合将成为发展趋势。

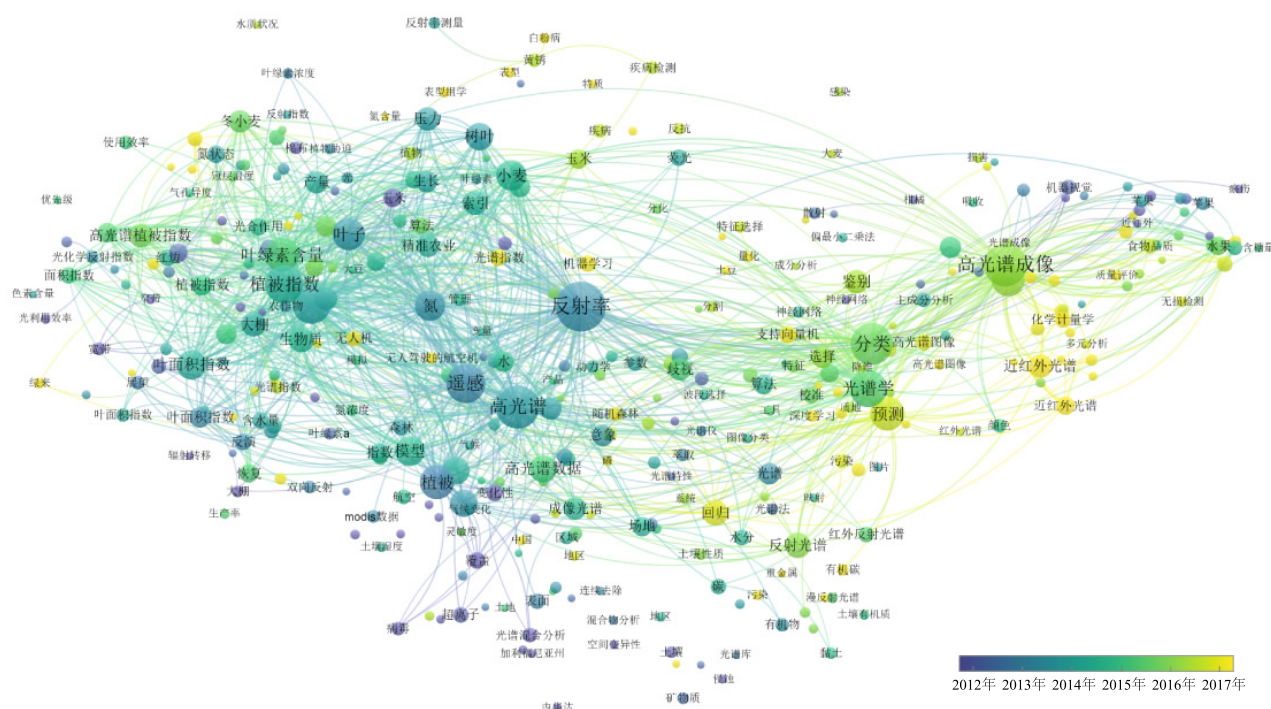


图6 高光谱技术在农业领域应用研究的关键词趋势分析

Fig.6 Trend analysis of keywords in the application of hyperspectral technology in agricultural field

3 结 论

在过去的 30 年中,有关高光谱技术在农业领域中应用的论文数量呈现指数性增长的趋势,从 2003 年开始,增长曲线的拟合 R^2 达到了 0.975 2,而高光谱技术在农业中的应用涉及多个学科,其中遥感学科的发文量最多,为 1 513 篇。发文影响力最大的国家为美国(h 指数为 98),次之为中国(h 指数为 62),且中国的发文量最多,美国、中国、德国、澳大利亚等国家在此领域的合作较为密切。

在发文量排名前 10 的机构中,中国的机构有 6 个,但影响力最高的机构为美国农业部(h 指数为 62)。在发文量排名前 10 的学者中,中国的学者有 6 个,在该领域影响力最高的学者为 Pablo J. Zarco-Tejada(h 指数为 31),来自西班牙国家研究理事会。浙江大学、中国科学院、美国农业部、西班牙国家研究理事会等机构在此领域的合作较为密切。在本领域影响力最大的期刊为 Remote Sensing of Environment(影响因子为 9.085、 h 指数为 82、总被引频次为 23 328 次),而来自 Postharvest Biology and Technology 的文章“Nondetructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: a review”具有最高的被引频次和年均被引频次,是本领域中较具影响力的文章。

通过关键词共线性网络分析可知,高光谱技术在农业领域的研究热点主要为更新研究方法及模型、对作物的相关深入研究、对数据的获取及分析方法的更新以及植株对光谱反应机制的研究。

参考文献:

- [1] 郑兰芬,王晋年. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究[J]. 环境遥感, 1992(1): 49-58,84.
- [2] 张学治. 基于冠层反射光谱的夏玉米氮素营养与生长监测研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [3] 马勤建. 基于高光谱植被指数的棉花冠层结构参数的估算研究[D]. 石河子:石河子大学, 2008.
- [4] 陈硕博. 无人机多光谱遥感反演棉花光合参数与水分的模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- [5] 房华乐,任润东,苏 飞,等. 高光谱遥感在农业中的应用[J]. 测绘通报, 2012(增刊): 255-257.
- [6] THENKABAIL P S, SMITH R B, PAUW E D. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(2): 158-182.
- [7] 刘冰峰. 夏玉米不同生育时期生理生态参数的高光谱遥感监测模型[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [8] 韩沁嫻. 基于近红外高光谱的甘草种子鉴别系统研建[D]. 北京:北京林业大学, 2020.
- [9] 彭晓伟,张爱军,王 楠,等. 高光谱成像技术在作物种子方面的应用[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(4): 23-32.
- [10] 曾 旭. 油菜三种叶片的成像高光谱特征与 SPAD 值估测建模[D]. 长沙:湖南农业大学, 2019.
- [11] 白青蒙,韩玉国,彭致功,等. 利用叶面积指数优化冬小麦高光谱水分预测模型[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(4): 943-950.
- [12] 张龙英. 不同土壤盐度下柠条锦鸡儿叶绿素荧光监测及种子性状研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020.
- [13] 贺 婷,李建东,刘桂鹏,等. 基于高光谱遥感的玉米全氮含量估测模型[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(3): 257-265.
- [14] 齐双丽. 基于多角度高光谱遥感的小麦白粉病监测研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2018.
- [15] 赵 珊. 基于高光谱成像的玉米苗期氮素营养监测的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
- [16] 肖珍珍,李 毅,冯 浩. 西北盐碱土壤理化性质的高光谱建模及预测(英文)[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1615-1622.
- [17] 安琪琪. 土壤重金属污染检测方法的研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(17): 166-168,173.
- [18] 包青岭,丁建丽,王敬哲,等. 基于随机森林算法的土壤有机质含量高光谱检测[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1404-1414.
- [19] 刘秀英. 玉米生理参数及农田土壤信息高光谱监测模型研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [20] MAO G Z, SHI T T, ZHANG S, et al. Bibliometric analysis of insights into soil remediation[J]. Journal of Soil & Sediments, 2018, 18(7): 2520-2534.
- [21] REDDY R L R, SHANKARAPPA T H, REDDY K S, et al. Review of trends in soil fertility research (2007-2016) using Scopus database[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2019, 50(1): 1-18.
- [22] 胡远妹,周 俊,刘海龙,等. 基于 Web of Science 对土壤重金属污染修复研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 707-720.
- [23] HIRSCH J E. An index to quantify an individual's scientific research output[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(46): 16569-16572.
- [24] CURRAN P J. Remote sensing of foliar chemistry[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(3): 271-278.
- [25] GITELSON A A, MERZLYAK M N, LICHTENTHALER H K. Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm[J]. J Plant Physiology, 1996, 148(3/4): 501-508.
- [26] HUNT E R, DORAISWAMY P C, MCMURTREY J E, et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the

- canopy scale[J]. International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation, 2013, 21(1): 103-112.
- [27] LYU J, DENG F L, YAN Z G. Using PROSEPCT and SVM for the estimation of chlorophyll concentration[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989/990/991/992/993/994: 2184-2187.
- [28] MORIER T, CAMBOURIS A N, CHOKMANI K. In-season nitrogen status assessment and yield estimation using hyperspectral vegetation indices in a potato crop[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(4): 1295-1309.
- [29] LI Z H, WANG J H, XU X G, et al. Assimilation of two variables derived from hyperspectral data into the DSSAT-CERES model for grain yield and quality estimation[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 12400-12418.
- [30] SIMKO I, JIMENEZ-BERNI J A, FURBANK R T. Detection of decay in fresh-cut lettuce using hyperspectral imaging and chlorophyll fluorescence imaging[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 106: 44-52.
- [31] ELMASRY G M, NAKAUCHI S. Image analysis operations applied to hyperspectral images for non-invasive sensing of food quality-a comprehensive review[J]. Biosystems Engineering, 2016, 142: 53-82.

(责任编辑:徐 艳)