

农作物冠层光谱信息检测技术及方法综述

方孝荣¹, 高俊峰^{2*}, 谢传奇², 朱逢乐², 黄凌霞³, 何勇^{2, 4*}

1. 金华职业技术学院, 浙江 金华 321017

2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058

3. 浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 310058

4. 浙江大学唐仲英传感材料及应用研究中心, 浙江 杭州 310058

摘要 相比传统的化学方法及主观视觉测定植物生理信息指标, 通过光谱辐射仪对农作物冠层信息的评估更简单、快速和精确。本文结合近年来农作物群体信息的获取方法, 综述了不同类型光谱仪尤其以国际上应用最广泛的 Cropscan 多光谱辐射仪在农作物群体叶面积指数、生物量、氮素及叶绿素的预测, 病虫害的监测及产量预测中的应用。总结了不同类型的植被指数(VIs)、冠层光谱的获取及光谱分析方法, 比较了不同农作物建立相关模型的回归系数。总体上建立的数学模型的相关系数较高, 能实现对农作物各种生理信息等的检测。此外, 将多光谱辐射仪与多种传感器相结合所得到的综合信息对于全面评价农作物生长情况具有重要指导价值。

关键词 光谱仪; Cropscan; 冠层; 植被指数; 病虫害

中图分类号: S-1; TP391.4

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2015)07-1949-07

引言

农作物群体的光谱特征反映了作物长势、叶绿素、组织及冠层结构等综合信息, 这也是基于遥感原理探究作物信息的重要依据。因为每种物质都具有发射、反射、吸收电磁波谱的物质特性, 通过测量每一波长辐射的吸收、发送或反射, 物质的特性就能被确定。采用光谱仪对作物冠层信息获取和分析具有简单、快速、精度高及无损伤测定的优势^[1-3]。目前, 基于光谱仪所获取农作物的冠层信息的方法已广泛应用到各个方面, 如描述植物的正常长势, 估算作物生物量、生物化学含量、产量、叶面积指数, 预测农作物因病虫害、空气污染、营养缺乏及化学药害所带来产量的损失, 监测除草剂活性的实效性以及对土壤改良剂和肥力、作物灌溉方式、干旱对作物生长状况和产量的影响等^[4-9]。本文结合了近年来国内外应用光谱仪获取农作物冠层信息的相关研究热点, 重点综述了应用最为广泛的 Cropscan 多光谱辐射仪在作物含氮量、叶面积指数及产量预测, 病虫害监测的相关文献。此外, 本文还探讨了目前此类研究中所存在的问题并分

析了相关原因, 总结了今后可能的发展趋势。

1 实验部分

1.1 仪器

目前获取近地作物冠层的光谱信息可以采用美国 ASD 公司生产的 Fieldspec FR 2500 型便携式高光谱仪、Fieldspec HH 光谱仪、Cropscan 公司生产的便携式多光谱辐射仪, Greenseeker 505 植物冠层光谱测定仪和 OMIS 实用性成像光谱仪等其他自主开发的冠层光谱仪^[10], 其中以 Cropscan 多光谱辐射仪的应用最为广泛, 研究较为深入。该公司生产了 MSR5, MSR87 及 MSR16 三种类型的多光谱辐射仪, 每种仪器的中心波段数及范围均不同。冠层信息采集时可根据具体选择的光谱仪的要求和实际测量需求确定检测高度及视角。检测最好选择晴朗无云或少云的天气, 在 10:00—14:00 时间点下进行。每个小区最好多测几个重复, 以减小相关测量误差。

1.2 方法

不同光谱仪采集的数据大小及格式一般不同, 一般情况

收稿日期: 2014-04-13, 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 国家(863 计划)课题项目(2013AA102301), 宁波市科技局重大项目(2011C11024)和浙江省蚕桑产业科技创新团队项目(2011R50028)资助

作者简介: 方孝荣, 1963 年生, 金华职业技术学院副教授 e-mail: jhxfy@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jfgao@zju.edu.cn; yhe@zju.edu.cn

下,所获取的数据为不同波长下的反射率。此类数据可以采用相关的数据分析软件进行处理,分析的方法包括直接利用光谱反射率,或光谱值的微分、求导及正交归一化等相关运算,也可通过不同波段下的光谱反射率组合不同类型的植被指数,明确组合的植被指数与作物农学变量的相关关系。再对模型进行显著性检验或线性、多元及逐步回归分析,建立预测模型以反演作物的测量指标并对其进行精度评价。

2 植被指数(VIs)

绿色植物叶片在可见红光波段具有较强的吸收特性,而

在近红外波段具有较强的反射特性,通过将这两个不同性质波段的组合可以得到不同形式的植被指数。各个植被指数在一定条件下能用来定量说明植被的生长状况^[11]。通过光谱仪所获取的信息是特定波段下的冠层反射率值。实际应用中,大多通过不同波段的反射率的组合来对各个影响因子的相关性进行验证。植被指数按发展阶段大致可以分为三类:基于波段线性组合的植被指数,消除影响因素的植被指数和针对高光谱遥感的植被指数,具体信息如表 1 所示。

Table 1 Algorithms and references of different vegetation indexes

植被指数	缩写	算法	参考文献	年份
归一化植被指数	NDVI	$(R_{NIR}-R_{Red})/(R_{NIR}+R_{Red})$	Rouse 等 ^[12]	1974
比值植被指数	RVI	R_{NIR}/R_{Red}	Pearson 等 ^[13]	1972
差值植被指数	DVI	$R_{NIR}-R_{Red}$	Jordan 等 ^[14]	1969
垂直植被指数	PVI	$(R_{NIR}-aR_{Red}-b)/\sqrt{1+a^2}$	Richardson 等 ^[15]	1977
重归一化植被指数	RDVI	$\sqrt{NDVI \times DVI}$	Roujean, Breon 等 ^[16]	1995
土壤调节植被指数	SAVI	$1.5(R_{NIR}+R_{Red})/(R_{NIR}+R_{Red}+0.5)$	Huete 等 ^[17]	1988
优化土壤调节植被指数	OSAVI	$(R_{NIR}+R_{Red})/(R_{NIR}+R_{Red}+0.16)$	Rondeaux 等 ^[18]	1996
转化型土壤调节指数	TSAVI	$a(\rho_{NIR}-a\rho_{Red}-b)/(\alpha\rho_{NIR}+\rho_{Red}-ab)$	Baret 等 ^[19]	1989
绿色归一化植被指数	GNDVI	$(R_{NIR}-R_{Green})/(R_{NIR}+R_{Green})$	Gitelson 等 ^[20]	1996
绿色比值植被指数	GRVI	R_{NIR}/R_{Green}	Shibayama 等 ^[21]	1989
权重差值植被指数	WDVI	$R_{NIR}-\alpha R_{VIS}$	Clevers ^[22]	1989
黄色指数	YI	$(R_{580}-2R_{630}+R_{680})/\Delta^2$	Adams 等 ^[23]	1999
可见抗大气指数	VARI	$(R_{Green}-R_{Red})/(R_{Red}+R_{Green}-R_{Blue})$	Gitelson 等 ^[24]	2002
归一化色素比值指数	NPCI	$(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$	Riedell 等 ^[25]	1999
结构独立色素指数	SIPI	$(R_{800}-R_{450})/(R_{800}+R_{680})$	Penuelas 等 ^[26]	1999
叶片含水指数	LMI	R_{1650}/R_{830}	Parkes 等 ^[27]	1997
全局环境监测指数	GEMI	$\eta(1-0.25\eta)-(R_{Red}-0.125)/(1-R_{Red})$	Pinty 等 ^[28]	1991
水波段指数	WBI	R_{980}/R_{900}	Riedell 等 ^[25]	1999

R_{NIR} 近红外波段的反射率; R_{Red} 红光的反射率; R_{Green} 绿光反射率; a, b, α 与土壤有关的常数; $\eta=[2(R_{NIR}^2-R_{Red}^2)+1.5R_{NIR}-0.5R_{Red}]/(R_{NIR}+R_{Red}+0.5)$

在遥感领域比较常见的有归一化植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、差值植被指数(DVI)、比值植被指数(RVI)和土壤调节植被指数(SAVI)等。这些植被指数与植物的许多参数相关,如叶面积指数,叶片叶绿素和氮含量,植被覆盖率和蒸散热。近年来,以 NDVI 值作为信息量对植被的生理状况监测研究较为普遍。DVI 属于线性植被指数,当叶面积指数较小时,效果较好。随着叶面积指数的增加,DVI 的值受土壤背景的干扰较大。对于比值植被指数(RVI),其值一般远大于 1,当地表没有明显的绿色植被时,其值约为 1,有绿色植被时,其值一般大于 2。因此 RVI 可以作为绿色植物的灵敏参数,与叶面积指数(LAI),生物量,叶绿素含量相关性较高。但 RVI 受环境的影响较大,大气效应会大大降低其对植被检测的灵敏度,在计算前需要对其进行大气校正。垂直植被指数(PVI)是基于土壤线的概念提出来的,将地物的反射率组成的点到土壤线的距离定义为垂直植被指数,土壤线左上方的点的 PVI 值取正,右下方的点的 PVI 值取负^[29]。与 RVI 相比,PVI 受土壤亮度的影响较小。

3 作物冠层信息的检测

3.1 含氮量检测

氮素是影响农作物生长、品质和产量的重要因素,实时监测和评价植株的氮素状况,对于农作物的精细化氮素管理与施肥以及实现品质生产力和作物的高产具有十分重要的意义。传统作物氮素监测和评估方法一般需要田间植株的取样和化学实验室的分析^[30, 31],虽然结果较为精确可靠,但费时费力,不能满足现代农业实时、快速、无损的发展要求。

表 2 所示列举了 Cropscan 多光谱辐射仪在农作物氮素预测中的应用,通过仪器获取的单波段冠层的光谱信息,构造不同的植被指数和不同的回归模型来比较哪种植被指数能够最好的预测植物的含氮量。同时可以针对农作物不同生长阶段下叶片氮素含量的预测,这种精细化的研究可以明确农作物在整个生长周期的所需的施氮量。从表 2 可知,在三种不同型号的光谱辐射仪中,MSR16 应用的最为广泛。这是

因为 MSR16 提供了较多的波长选择范围,从而可以构建更多的植被指数,然后再选择对预测氮含量效果最好的植被指数。对比发现,选择比值植被指数(RVI)较多,且所构建线性函数的决定系数在 0.66~0.966 9 之间。其中影响植株氮含量预测结果的准确性和稳定性主要有以下两种因素。

Table 2 Applications of CROPSCAN multi-spectral radiometer in nitrogen prediction

农作物	样本数	生长周期	仪器型号	植被指数	回归方程	相关系数
番茄 ^[31]	603	开花早期	MSR87	NIR/ R_{560}	多项式	0.61
稻麦 ^[33]			MSR16	R_{870}/R_{660}	指数函数	0.798 8
棉花 ^[34]			MSR87	G-NDVI	线性函数	0.73
玉米 ^[35]	148		MSR16	NDVI	线性函数	0.36
小麦 ^[36]			MSR16	R_{870}/R_{660}	线性函数	0.85
小麦 ^[37]			MSR16	NDVI(950, 710)	线性函数	0.873
小麦 ^[38]	60 个小区	开花期	MSR5	NDVI	线性函数	0.83
小麦 ^[35]	381		MSR16	$R_{1\ 100}/R_{660}$	指数函数	0.849 8
小麦 ^[41]			MSR16	NDVI(1220, 710)	线性函数	0.843
小麦 ^[42]		中后期	MSR16	R_{950}/R_{710}	线性函数	0.778 8
马铃薯 ^[43]	34	生长的前后期	MSR87	Red edge position	幂指数函数	0.82
马铃薯 ^[42]		花苞期	MSR87	Red edge position	幂指数函数	0.82
水稻 ^[43]	60	分蘖	MSR16	R_{810}/R_{560}	线性函数	0.966 9
水稻 ^[33]	222	齐穗期	MSR16	R_{870}/R_{660}	线性函数	0.642 5
水稻 ^[44]	7 个小区	分蘖和拔节期	MSR16	$R_{760}-R_{710}$	指数函数	0.94
水稻 ^[45]	130	全生育期	MSR16	R_{810}/R_{560}	线性函数	0.898 5
水稻 ^[46]	84	抽穗和灌浆期	MSR16	NDVI(1 650, 710)	对数函数	0.797 8
水稻 ^[47]	192	全生育期	MSR16	$R_{1\ 100}/R_{560}$	线性函数	0.832
水稻 ^[36]	107		MSR16	R_{810}/R_{660}	线性函数	0.66

3.1.1 作物种类及生长周期

不同的作物在形态学方面有很大的差异,而多光谱辐射仪所接受的冠层反射光谱信息与农作物本身的形态学密切相关。在表 2 可以大致看出,小麦、水稻预测的决定系数较高,一般 R^2 在 0.8 以上,而番茄和玉米的较低。而在同一作物不同的生长阶段,氮含量预测的准确度和稳定性也有差异,如小麦在开花期和孕穗期间,其预测的决定系数较高,说明预测的准确度也较高。因此,在适宜情况下,应选择预测准确度较高的作物生长周期。同时,为了消减这种因生长周期带来的不确定性,实际情况中可以对农作物整个生长阶段进行监测。此外,对于同一种农作物,品种的类型也会带来一定的影响,如低蛋白质、中蛋白质和高蛋白质三种品种类型的小麦,高蛋白质品种的回归方程的决定系数比低蛋白质小麦品种的高^[45]。

3.1.2 测量时天气状况等外在因素

便携式光谱仪在实际测量中,最好在晴朗无云的天气下进行,这样可以保证足够的入射光通量。实际中,云层等不可控因素会在一定条件下影响所获取信息的稳定性。Chang 等^[48]对云层等外界环境的变化影响地面辐射仪信息的获取进行了研究。指出云的遮挡改变了大气条件使得光的辐照度发生变化,如果在连续采样测量的情况下,仪器所测得数据有一定的误差,同时减小的入射辐照度则在反射率校正时产生误差。此外传感器与入射光的辐照度和表面反射率已不是线性关系,因此当入射辐照度变化时,所计算出的反射率也是变化的。

3.2 叶面积指数(LAI)测定

叶面积指数是表征植被冠层的基本参量之一,它与植被的光合作用、呼吸作用、蒸腾、碳循环和降水截获等许多生理过程密切相关^[49]。LAI 有两种定义,一种是全部表面 LAI,即单位地面面积上所有叶子表面表面积的总和,另一种是单面 LAI,即单位面积上所有叶子向下投影的面积总和^[50]。实际中叶面积指数的测定有直接和间接两种方法,直接法是一种较为传统、准确,但是有一定破坏性的方法。间接法则是用一些测量参数或用光学仪器得到叶面积指数,测量方便快捷,但需要用直接测量方法对所得结果进行一定的校正。通过多光谱辐射仪来估测农作物的叶面积指数是近年来的研究热点。Jongschaap 等^[51]运用 MSR87 型多光谱辐射仪对种植的马铃薯植株的叶面积进行了分析和预测,通过构建权重差值植被指数(WDVI)与叶面积指数建立了回归方程,其方程的决定系数为 0.87。Vaesen 等^[52]对水稻的叶面积指数进行了研究,也构建了基于 WDVI 的回归方程,其决定系数为 0.831 2。Sarlikiot 等^[53]对温室中番茄和甜椒两种不同的植株的叶面积指数进行了研究,比较了单波段和归一化植被指数(NDVI)建立回归方程的决定系数和均方根误差(RMSE),得出 460 nm 波段下的效果最好。其中番茄植株的决定系数和均方根误差分别为 0.954 和 0.29,甜椒植株为 0.884 和 0.36。也有对农作物在受到病虫害侵害、干旱、灌溉胁迫下叶面积指数发生的变化^[54-58]。

3.3 病虫害监测

病虫害监测预防是保证农作物高产量的基础,传统病虫害的检测方法分为人工识别和化学检测,前者主要基于一些具有多年经验的农业植保专家,这种方法主观性较强。而化

学检测虽然结果较为客观准确但耗时耗力且成本较高,这些均不符合现代农业的要求。应用光谱技术可以实时获取植物的生长过程的信息。目前,基于可见近红外光谱仪、多光谱成像仪以及高光谱成像仪对农作物病虫害的研究均取得了一定的进展^[59-63]。其中应用较多的多光谱辐射仪携带方便、操作简单,在天气良好的状况下,随时随地的进行测量和监测,目前在田间应用的一些移动式平台也常常配置多光谱辐射仪和其他的信息获取设备来多方面获取农田作物信息^[64]。

3.3.1 病害检测

植物病害对于农作物的健康生长具有严重的危害,不仅导致农作物和农产品的产量和质量的下降,同时也使农药等化学药品大量使用,造成环境的恶化。因此植物病害的研究对农业经济的发展具有十分重要的意义,而对于农作物病害的事先有效的监测可以大大降低因病害所带来的经济损失^[65]。图 1 为应用多光谱辐射仪对农作物病害的监测及与最终产量建立模型关系的流程图。通过杀真菌剂,施氮水平等外界的处理,利用 Cropscan 仪获取相应处理与对照植物的冠层信息,然后利用数学建模的方法建立输出量与光谱的关系。Steddom 等^[66]利用 MSR16 多光谱辐射仪对由褐斑病菌感染的甜菜叶进行了监测研究,评估了 MSR16 仪对该病害评估的准确性、稳定性及灵敏性,比较了单波段和以单波段所构造植被指数预测病害的准确性。通过重复性的测量实验,所得到的变异系数、F 值来验证多光谱辐射仪的这些特性。最后得出利用 MSR16 可以有效的判定甜菜叶的褐斑病。Pethybridge 等^[67]利用手持式的多光谱辐射仪 MSR5 对匹菊属植物的叶子病害进行了研究,探讨了在不同生长阶段下,应用该仪器的准确性。表明比值植被指数 1650/830 所得到的数学模型与病害的相关系数最高。病害监测的研究思路一般均为构造不同的植被指数建立病害的相关性,然后比较所建模型的稳定性,在不同的植物种类上,所构建模型稳定性亦有差异。

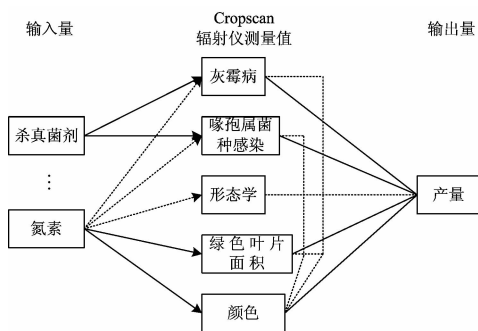


Fig. 1 Diagram of monitoring plant diseases by using CROPSCAN

3.3.2 虫害预测

植物在遭受虫害感染后,其叶片的外观形状和生理效应均有所变化,如卷叶、落叶、枯萎,叶片内的酶等生化指标;同时叶绿素组织遭受损害,相应的光合作用减弱,养分的吸收、运输及转换等机能减弱^[68]。与正常的植株相比,受虫害的植株的光谱的某些特征波段所对应的反射率会发生一定的

变化。因此运用光谱分析技术可以对农作物的虫害进行快速诊断,为适量喷洒农药提供合理的依据,减小由虫害所带来的产量损失。Yang 等^[69-70]利用多光谱辐射仪探究小麦在蚜虫侵染下的胁迫反应,所得到的单波段反射率及植被指数在 SAS 统计软件进行分析,结果表明该方法具有可行性,同时也能鉴别麦二叉蚜和俄国小麦蚜虫的种类。其中构造的比值植被指数 800/450 和 950/450 nm 都能较好的监测小麦被蚜虫侵染后的胁迫反应。

3.4 产量预测

农作物生育早期的产量估测对于制定整个生长期的精准管理策略具有重要的参考意义。作物产量的预测是以作物生长状况在光谱特征得到表征为理论基础的。基于农作物各个生长周期的不同植被指数的组合进行产量的估算是最为常见的方法,其中绿度植被指数由 Kauth 和 Thomas 针对多光谱数据提出,对农作物生长状况的检测较为敏感^[71]。Reyniers 等^[72]对比了多光谱辐射仪和彩色红外图像在估测产量的准确性,得出了这两种测量系统均能预测小麦的产量,其相关系数均大于 0.94。然而通过地面手持式多光谱仪所建立的归一化植被指数 NDVI 对产量预测准确性要优于基于空中图像对产量的预测,多光谱辐射仪对产量预测的误差小于 6.8%。对于产量的预测,掌握整个种植区域的产量的分布情况对于制定相应的精准管理决策具有重要的意义。目前,基于车载平台,通过多光谱辐射仪获取的农作物冠层光谱信息与 GPS 获取的地理位置信息融合,最终建立农田的作物产量分布图。图 2 为利用遥感原理建立的模型预测农作物产量的方法流程图。

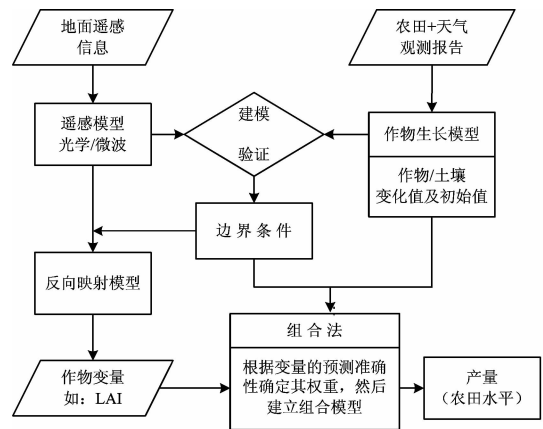


Fig. 2 Schematic illustration of the methodology for crop predicting

4 结语与展望

综述了光谱仪在监测农作物各种生化指标、病虫害及产量预测中的应用。实际应用中,根据测量的要求,较为普遍采用 MSR16 多光谱辐射仪。通过单波段的光谱反射率信息组合植被指数,普遍采用的是归一化植被指数和比值植被指数。并以相关的植被指数为自变量建立相关的数学模型进行预测。其中以线性模型较为普遍,效果较好,其预测的相关系数一般在 0.64~0.97 之间。这种相关性在不同的农作物

种类和不同生长阶段均有差异,对比发现,小麦作物较其他农作物的相关数学模型较为稳定,效果也较好。虽然多光谱辐射仪具有快速、方便等优势,但是也需要指出的是通过该仪器选择的波段较为有限,有时并不能找到能完全表达作物的信息特征。而 ASD Fieldspec 光谱仪的波长范围较广,可以针对特定信息下的特征波段的提取提供基础。同时基于农田的复杂环境及背景,太阳高度角及作物群体的结构变化等因素的存在,使的光谱仪获取信息的准确性降低,而所建立模型的稳定性也有待于进一步的研究,因此探索新的作物冠层光谱遥感监测方法是进一步提高冠层光谱实用性的途径。

作物冠层光谱信息的获取及处理是现代农业实际应用中

重要的一部分,也是实施精准农业必不可少的内容。它可为精准农业提供农作物长势、施肥量、病虫害监测和受不良生物非生物逆境胁迫的严重程度等信息,实现对田间定位、定量的精准管理。随着光谱分析方法的改进和监测模型的完善。结合遥感及数字农业技术的进步与发展,通过将光谱仪等多种传感器集成到智能农业机械上,可以快速对准确获取的作物冠层光谱信息实施运算。从而完成后续精准化施肥管理、精准水分管理和病害监测等一系列程序化工作。同时作物冠层光谱分析结合无人机的高光谱成像遥感技术,进行多平台、大尺度的遥感监测也将是未来农业信息化的重要研究应用方向。

References

- [1] Vaesen K, Gilliams S, Nackaerts K, et al. *Field Crops Research*, 2001, 1: 13.
- [2] Steddom K, Heidel G, Jones D, et al. *Phytopathology*, 2003, 93: 720.
- [3] Lisandro Rambo, Ma Baoluo, Xiong Youcai, et al. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 3: 434.
- [4] Muchow R C. *Field Crops Research*, 1998, 56: 209.
- [5] Sangoi L, Gracietti M A, Rampazzo C, et al. *Field Crops Research*, 2002, 79: 39.
- [6] Subedi K D, Ma B L. *Plant Soil*, 2005, 273: 189.
- [7] Westgate M E, Forvella F, Reicosky D C, et al. *Field Crops Research*, 1997, 49: 249.
- [8] Hoffmann C M, Blomberg M. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2004, 190: 197.
- [9] FENG Lei, FANG Hui, ZHOU Wei-jun, et al(冯雷,方慧,周伟军,等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(9): 1749.
- [10] YANG Fen-tuan, LI Gang, JIANG Xiao-li, et al(杨粉团,李刚,姜晓丽,等). *Journal of Jilin Agricultural Sciences(吉林农业科学)*, 2011, 36(6): 9.
- [11] Fei Yuan, Marvin E. Bauer. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 3: 375.
- [12] Rouse J W, Haas R H. *Third ERTS Symposium*, 1973, 1: 309. Washington, DC: NASA
- [13] Pearson R L, Miller D L. *Proceeding of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 1972, 2: 1357.
- [14] Jordan C F. *Ecology*, 1969, 50: 663.
- [15] Richardson A J, Wiegand C L. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, (02): 1541.
- [16] Roujean J L, Boreon F M. *Remote Sensing Environment*, 1995, 51: 375.
- [17] Huete A R. *Remote Sensing Environment*, 1988, 25: 295.
- [18] Rondeaux G, Steven M, Baret F. *Remote Sensing Environment*, 1996, 55(2): 95.
- [19] Baret F, Guyot G. *Remote Sensing Environment*, 1991, 35: 161.
- [20] Gitelson A A, Merzlyak M N. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3/4): 494.
- [21] Shibayama M Akiyama. *Remote Sensing Environment*, 1989, 27: 119.
- [22] Clevers J G P W. *Remote Sensing Environment*, 1989, 29: 25.
- [23] Adams M L, Philpot W D, Norvell W A. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20: 3663.
- [24] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. *Remote Sensing Environment*, 2002, 80: 76.
- [25] Riedell W E, Blackmer T M. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1835.
- [26] Penuelas J, Inoue Y. *Photosynthetica*, 1999, 36(3): 355.
- [27] Parkes I. *Earth Observation Science*, 1997, 10: 112.
- [28] Pinty B, Verstraete M M. *Vegetation*, 1991, 101: 15.
- [29] XU Dan-dan, LI Wen-long, WANG Xun, et al(徐丹丹,李文龙,王迅,等). *Journal of Lanzhou University(Natural Science)(兰州大学学报·自然科学版)*, 2010, 5: 102.
- [30] Roth G W, Fox R H. *Agron. J.*, 1989, 81: 502.
- [31] Wu Di, Chen Jianyang, Lu Baiyi, et al. *Food Chemistry*, 135(4): 2147.
- [32] Gianquinto G, Orsini F, Fecondinia M, et al. *European Journal of Agronomy*, 2011, 35(3): 135.
- [33] ZHU Yan, YAO Xia, TIAN Yong-chao, et al(朱艳,姚霞,田永超,等). *Chinese Journal of Plant Ecology(植物生态学报)*, 2006, (06): 983.
- [34] Oliveira L F, Scharf P C, Vories E D, et al. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(1): 173.
- [35] Lisandro Rambo, Ma Baoluo, Xiong Youcai, et al. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 173(3): 434.

- [36] Zhu Y, Yao X, Tian Y, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1): 1.
- [37] Yao X, Yao X, Jia W et al. *Sensors*, 2013, 13(3): 3109.
- [38] Reyniers M, Vrindts E. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(3): 549.
- [39] LI Ying-xue, ZHU Yan, TIAN Yong-chao, et al(李映雪, 朱 艳, 田永超, 等). *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2006, 32(3): 358.
- [40] TIAN Yong-chao, ZHU Yan, CAO Wei-xing(田永超, 朱 艳, 曹卫星). *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2005, 31(3): 355.
- [41] Jongschaap R E E. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(4): 316.
- [42] Jongschaap R E E, Booij R. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(3): 205.
- [43] Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1): 135.
- [44] CHEN Qing-chun, TIAN Yong-chao, GU Kai-jian, et al(陈青春, 田永超, 顾凯健, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering(农业工程学报)*, 2011, (01): 223.
- [45] XUE Li-hong, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al(薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2003, 36(7): 807.
- [46] XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, FAN Xiao-hui(薛利红, 杨林章, 范小晖). *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2006, 32(03): 430.
- [47] ZHOU Dong-qin, ZHU Yan, TIAN Yong-chao, et al(周冬琴, 朱 艳, 田永超, 等). *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2006, 32(9): 1316.
- [48] Chang J, Clay S A, Clay D E, et al. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(13–14): 1799.
- [49] Chen J M, Cihlar J. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55: 153.
- [50] FANG Xiu-qin, ZHANG Wan-chang(方秀琴, 张万昌). *Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感)*, 2003, 57(3): 58.
- [51] Raymond E E. Jongschaap. *European Journal of Agronomy*, 2006, (24): 316.
- [52] Vaesen K, Gilliams S, Nackaerts K, et al. *Field Crops Research*, 2001, 69: 13.
- [53] Sarlikioti V, Meinen E, Marcelis L F M. *Biosystems Engineering*, 2011, 108: 114.
- [54] Doraiswamy P C, Sinclair T R, Hollinger S, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 192.
- [55] Bertholdsson N O. *European Journal of Agronomy*, 1999, 10: 1.
- [56] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J. *Field Crops Research*, 1998, 55: 83.
- [57] Duchemin B, Hadria R, Erraki S, et al. *Agricultural Water Management*, 2006, 79: 1.
- [58] Guan J, F. W. Nutter F W Jr. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 37: 97.
- [59] WU Da-ke, MA Cheng-wei, DU Shang-feng(吴达科, 马承伟, 杜尚丰). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (农业机械学报)*, 2007, 38(10): 87.
- [60] LI Bo, LIU Zhan-yu, HUANG Jing-feng, et al(李 波, 刘占宇, 黄敬峰, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering(农业工程学报)*, 2009, (09): 143.
- [61] WU Di, FENG Lei, ZHANG Chuan-qing, et al(吴 迪, 冯 雷, 张传清, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(11): 2208.
- [62] Xu H R, Ying Y B, Fu X P, et al. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(4): 447.
- [63] Bravo C, Moshou D. *Biosystems Engineering*, 2003, 84(2): 137.
- [64] Mieke Reyniers, Els Vrindts, Josse De Baerdemaeker. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24: 87.
- [65] WU Di, FENG Lei, ZHANG Chuan-qing, et al(吴 迪, 冯 雷, 张传清, 等). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2007, 4: 269.
- [66] Steddom K, Bredehoeft M W, Khan M, et al. *Plant Disease*, 2005, 5: 153.
- [67] Sarah J. Pethybridge, Frank Hay, Paul Esker, et al. *Plant Disease*, 2007, 91: 1397.
- [68] WU Shu-wen, WANG Chao-ren, CHEN Xiao-bin, et al(吴曙雯, 王潮人, 陈晓斌, 等). *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)(上海交通大学学报·农业科学版)*, 2002, 20(1): 73.
- [69] Yang Z, Rao M N, Elliott N C, et al. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 47: 121.
- [70] Yang Z, Rao M N, Elliott N C, et al. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 67: 64.
- [71] YAO Yun-jun, QIN Qi-ming, ZHANG Qi-li, et al(姚云军, 秦其明, 张自力, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering(农业工程学报)*, 2008, 7: 301.
- [72] Mieke Reyniers, Els Vrindts, Josse De Baerdemaeker. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24: 87.

Review of Crop Canopy Spectral Information Detection Technology and Methods

FANG Xiao-rong¹, GAO Jun-feng^{2*}, XIE Chuan-qi², ZHU Feng-le², HUANG Ling-xia³, HE Yong^{2, 4*}

1. Jinhua Polytechnic, Jinhua 312017, China

2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

3. College of Animal Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

4. Cyrus Tang Center for Sensor Materials and Applications, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract Compared with the traditional chemical methods and the subjective visual ways for measuring plant physiology information indicators, the assessments of crop canopy information through spectral radiometer are more simple, rapid and accurate. The applications of different types of spectral radiometer, especially for international general used Cropscan multispectral radiometer, for predicting crop canopy leaf area index under different growth stage, biomass, nitrogen, chlorophyll and yield, and monitoring plant diseases and insect pests were summarized based on crop group information acquisition methods in recent years. The variety of vegetation indices (VIs) were concluded after comparing regression coefficients of related models among different crops. In general, the correlation coefficients of mathematical models were high and it can realize the crop detection of various kinds of physiological information. Besides, the combination of multispectral radiometer and other sensors can provide useful information to evaluate the status of crops growth, which is very important in practice.

Keywords Spectrometer; Cropscan; Canopy; Vegetation index; Plant diseases and insect pests

(Received Apr. 13, 2014; accepted Aug. 15, 2014)

* Corresponding authors