

特约综述 Invited Review

光谱分析在植物生理生态研究中的应用

薛忠财, 高辉远*, 彭涛, 姚广

山东农业大学, 作物生物学国家重点实验室, 山东省作物生物学重点实验室, 山东泰安271018

摘要: 本文介绍了光谱分析技术在植物生理生态研究中的应用。通过分析植物叶片和冠层的反射光谱特征, 可以快速、无损地研究不同环境条件下植物的各种色素含量、叶黄素循环组分、营养状况、水分状况、光能利用效率、植被盖度以及冠层结构等生理生态特征, 此外光谱分析还能用来监测湖泊、河流中水华的发生和分布、研究生态系统中CO₂和H₂O的通量以及各种逆境胁迫和放牧等对植物生长的影响。

关键词: 光谱分析; 植被指数; 色素含量; 光能利用效率; 水华; CO₂和H₂O的通量

Application of Spectral Reflectance on Research of Plant Eco-Physiology

XUE Zhong-Cai, GAO Hui-Yuan*, PENG Tao, YAO Guang

Shandong Key Laboratory of Crop Biology, State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China

Abstract: The application of spectral reflectance on research of plant eco-physiology was reviewed. By analysis of spectral reflectance of plant on leaf or canopy levels, concentration of different kinds of pigments, components of xanthophyll cycle, nutrition status, water status, light use efficiency, vegetation coverage and canopy structure of plant under different environments can be fast and non-destructively investigated. In addition, the spectral reflectance can be used to detect algae-bloom in lakes and rivers, carbon and water vapor fluxes in ecosystem atmosphere, and effect of different kinds of stress and graze on plant growth.

Key words: spectral reflectance; vegetation index; pigment content; light use efficiency; algae-bloom; CO₂ and H₂O fluxes

在植物的生理生态研究中, 植物的色素含量、营养状况、水分含量、光合速率、光能利用效率等是衡量植物生长和生理状况的重要指标。通常用传统的化学分析法测定植物的色素含量和营养状况, 虽然测定结果直观可靠, 但对植物具有破坏性, 也无法对同一植物材料进行长期的动态监测, 并且费工费时, 成本较高。用气体交换法测定光合速率, 虽然是活体测定, 但只能局限于单叶、个体或小群体的测定, 不能够反映较大的植物群体或生态系统的光合作用状况, 也无法测定不同形状植物果实的光合能力。近年来, 光谱分析技术的发展使其在植物生理生态研究中得到愈来愈广泛的应用, 可以实时、快速、无损地从事叶片水平、群体水平以及生态系统等多个层面研究植物在各种环境条件下的生理生态变化。

物质在电磁波作用下, 由于电子跃迁、原子、分子振动和转动等复杂作用, 会在某些特定

波长位置形成反映物质组成和结构信息的光谱吸收和反射特征, 物质这种对不同波段光谱的响应特性叫光谱特性。植物光谱分析便是基于植物光谱特性来分析前面提到的各种生理生态参数。图1-A为典型的绿色植物在可见光-近红外光区反射光谱。在500 nm蓝光处和680 nm的红光处有两个低谷, 主要由叶绿素强烈吸收引起, 550 nm附近是叶绿素的强反射峰。700~1100 nm近红外区的反射主要是由于植物叶片内部组织结构多次反射、散射的结果(Peñuelas和Filella 1998)。不同植物或同一植物在不同的生长发育阶段或不同的环境条件下, 体内的各种色素含量、水分含量以及生理生化状况都会发生相应变化, 从而引起植物反射

收稿 2011-03-16 修定 2011-03-25

资助 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB118505)和国家自然科学基金(30671451和30571125)。

* 通讯作者(E-mail: gaohy@sdau.edu.cn; Tel: 0538-8245985)。

光谱特性的变化(Peñuelas和Filella 1998; Van Gaalen等2007; Naidu等2009; 薛忠财等2011a, b)。

因此, 通过光谱分析便可以对植物的生理、生化及生态状况进行无损伤检测和分析。

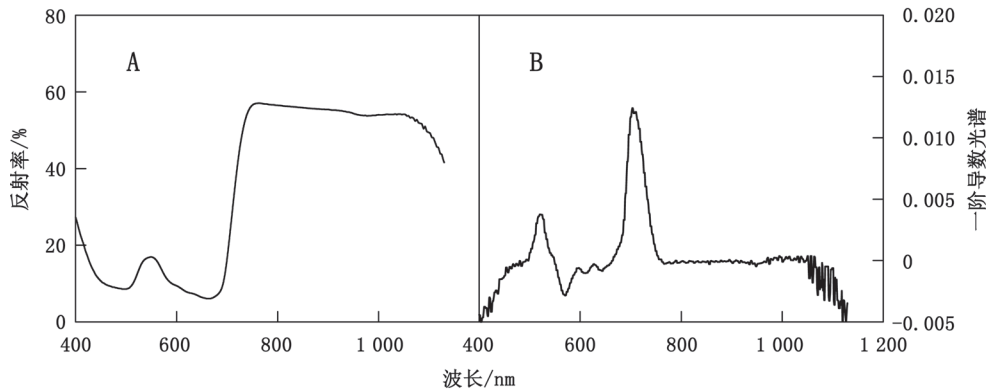


图1 典型绿色植物在可见光-近红外光区的反射光谱(A)及其一阶导数光谱(B)

Fig.1 Spectral reflectance (A) and the first derivative reflectance (B) of a typical green plant in visible and near-infrared regions

光谱仪的种类较多, 根据分辨率的高低, 可将其分为“高光谱”(hyperspectral)和“多光谱”(multi-spectral)分析仪两大类型。光谱分辨率在 10^{-1} λ 数量级范围的称为多光谱, 这类光谱仪的分辨率较低, 卫星搭载的光谱仪主要是多光谱分析仪, 它们主要用于森林、植被、水域、河流、海洋、沙漠等大尺度的测定。光谱分辨率在 10^{-2} λ 或更高分辨率的光谱信息称之为高光谱; 随着光谱分辨率的进一步提高, 在达到 10^{-3} λ 时, 光谱分析即进入超高光谱(ultraspectral)阶段。高光谱分析仪可将测定的波段范围的光谱分割成许多非常窄的光谱波段信息, 如美国的Unispec光谱仪将光谱分成3.3 nm间隔的光谱波段信息, 能精确分析很窄波段的光谱变化, 从而能够检测到多光谱分析仪不能检测到的物质以及植物体内复杂的生理生化变化。

1 植物色素含量测定

当植物衰老、感病、营养亏缺以及遭受环境胁迫时, 都会引起体内色素组成和含量的变化, 因此植物组织中色素的含量和组成是衡量植物生理状态的重要指标。目前, 人们已经建立了测定各种色素含量的光谱反射指数(表1)。用光谱分析法测定色素含量不但快捷、简便, 而且一次测定便能分析出各种色素的含量。我们对几种不同植物叶片的色素含量分析证明, 用光谱分析测定的叶绿素、类胡萝卜素和花青素含量与传统的化学分析法测定结果呈极显著的相关(彭涛等2006)。孙

山等用Unispec光谱仪监测了板栗幼叶展开过程(孙山等2009b)以及苹果在整个发育过程(孙山2009)中果皮中叶绿素(a, b和总量)、类胡萝卜素和花青素含量的动态变化, 其测定结果与传统的化学分析测定结果呈极显著的相关。此外, 光谱反射技术还可以准确快速地分析不同花朵和叶片的色彩, 为观赏园艺的研究提供了便利手段。

1.1 叶绿素含量的测定

叶绿素在红光和蓝光区有很强的吸收峰, 然而由于在蓝光区的吸收峰与类胡萝卜素的吸收峰重叠, 所以一般不用蓝光区的反射率估计叶绿素的含量。研究证明归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI) (Rouse等1974)与叶绿素含量成正比, 但是当叶片中叶绿素含量过高就导致在680 nm处的吸收饱和, 降低了该指数对叶绿素含量较高叶片的敏感性(Thomas和Gausman 1977)。Gitelson和Merzlyak (1994)提出的绿色归一化差值植被指数(green normalized difference vegetation index, Green NDVI), 弥补了NDVI的不足, 可以更好地反映植物叶片中叶绿素的含量(Datt 1998)。然而由于叶片结构不同, 叶片厚度、表皮厚度、表皮毛、蜡质层等都能影响叶绿素指数的敏感性, Sims和Gamon (2002)通过对胶皮糖香树(*Liquidambar styraciflua* L.)的研究表明, 当总叶绿素含量大于 $0.04 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 445 nm处的光谱反射(R_{445})保持不变, 并且叶绿素和类胡萝卜

表1 几种常用的分析植物叶绿素、类胡萝卜素、花青素和藻蓝素含量的光谱反射指数

Table 1 Several spectral reflectance indexes to analyze content of chlorophyll, carotenoid, anthocyanin and phycocyanin in plant

色素	光谱反射指数	参考文献
叶绿素总量	$NDVI=(R_{800}-R_{680})/(R_{800}+R_{680})$	Rouse等1974
	$Green\ NDVI=(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	Gitelson和Merzlyak 1994
	$mSR_{705}=(R_{750}-R_{445})/(R_{705}-R_{445})$	Sims和Gamon 2002
	$mND_{705}=(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445})$	Sims和Gamon 2002
叶绿素a	$PSSR_a=R_{800}/R_{680}$	Blackburn 1998
	$RARS_a=R_{675}/R_{700}$	Chappelle和Kim 1992
叶绿素b	$PSSR_b=R_{800}/R_{635}$	Blackburn 1998
	$PSND_b=(R_{800}-R_{635})/(R_{800}+R_{635})$	Blackburn 1998
	$RARS_b=R_{675}/(R_{650} \times R_{700})$	Chappelle和Kim 1992
类胡萝卜素/叶绿素	$SIPI=(R_{800}-R_{445})/(R_{800}-R_{680})$	Peñuelas等1995a
	$PSRI=(R_{680}-R_{500})/R_{750}$	Merzlyak等1999
叶黄素循环	$PRI=(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	Gamon等1992
花青素	$R_{Red}/R_{Green}=\text{Sum}(R_{600}\text{ to }R_{699})/\text{Sum}(R_{500}\text{ to }R_{599})$	Gamon和Surfus 1999
	$ARI=(1/R_{550}-1/R_{700})$	Meralyak等1999
	$mARI=R_{800}(1/R_{550}-1/R_{700})$	Meralyak等2003
藻蓝素	$PC=R_{700}/R_{600}$	Mishra等2009

R_x 为植物在x波长处的光谱反射率。

素对445 nm的光吸收最小,因而提出了用 R_{445} 消除叶片结构对光谱反射的影响,建立了改良红边归一化植被指数(modified red-edge normalized difference vegetation index, mND_{705})和改良红边比值(modified red-edge ratio, mSR_{705}),广泛用于多种植物叶绿素含量的估算。由于叶绿素对红光的强烈吸收和叶片对近红外光的反射,导致反射光谱在680~750 nm处急剧上升、在光谱反射的一阶导数曲线上形成最大峰值,该区域被称为“红边”(图1-B),由红边计算出来的参数与叶绿素含量、生物量和叶面积有很好的相关性(Filella和Peñuelas 1994),因此红边参数已被作为反映生物和非生物胁迫的重要指标。另外,利用色素简单比值(pigment-specific simple ratio, PSSR)、色素归一化指数(pigment-specific normalized difference, PSND)和反射光谱比值分析(ratio analysis of reflectance spectra, RARS)等参数可以计算叶绿素a和b的含量(Chappelle和Kim 1992; Blackburn 1998)。

1.2 类胡萝卜素含量的测定

Peñuelas等(1995a)和Merzlyak等(1999)研究发现,用反射指数估计类胡萝卜素/叶绿素比值比单纯估计类胡萝卜素的含量更稳定。Peñuelas等(1995a)建立了结构不敏感色素指数(structure-insensitive pigment index, SIPI),通过估计类胡萝卜

素和叶绿素a的比值来反映植物的生长状态,消除了叶片结构的影响,可以测定不同条件下,不同植物叶片中类胡萝卜素和叶绿素a的相对变化。Merzlyak等(1999)研究发现,类胡萝卜素/叶绿素比值可以反映植物的衰老状况,因而建立了植物衰老反射指数(plant senescence reflectance index, PSRI)。在衰老的叶片和成熟的果实中,PSRI与类胡萝卜素的含量高度相关(Merzlyak等1999, 2003)。

1.3 叶黄素循环组分的测定

叶黄素循环作为植物光破坏防御的一种重要机制,是近些年来研究热点。通常使用高效液相色谱测定叶黄素循环组分(赵世杰等1995),既费时又昂贵,而且要破坏被测的植物组织。此外,化学分析法无法研究植物冠层水平上的叶黄素循环过程。Gamon等(1992)的研究表明植物在531 nm处的反射率可以敏感地反映叶黄素循环组分间的相互转换,并以570 nm作为参考波段,建立了光化学反射指数(photochemical reflectance index, PRI)。当植物叶片由暗处转到光下后, PRI的变化可以很好地反映紫黄质(V)脱环氧化转化成环氧玉米黄质(A)和玉米黄质(Z)的快速转变过程。我们近期研究表明,无论是叶片水平还是冠层水平, PRI均能非常好地反映植物叶黄素循环和过剩光

能的耗散过程(彭涛等2009)。另外,植物在暗适应下的PRI与充分光适应下的PRI之差(Δ PRI)可以很好地反映叶黄素循环库的大小(Gamon和Surfuss 1999)。光谱分析技术为叶黄素循环快速无损伤检测和植物冠层水平叶黄素循环的研究提供了一个切实可行的方法。

1.4 花青素含量的测定

Gamon和Surfuss (1999)的研究发现植物在可见光波段对红光和绿光区的反射比能有效地反映叶片花青素的含量,并建立了一个反映花青素含量的指数($R_{\text{Red}}/R_{\text{Green}}$)。Merzlyak等(1997)研究了3种色素含量丰富的植物在可见光和近红外区的吸收和反射光谱,比较了含有花青素和不含花青素的叶片(叶绿素含量相同)的反射光谱,发现550 nm处的光谱反射率对花青素含量非常敏感,并在700 nm处的光谱反射率消除叶绿素对花青素的影响,建立了花青素反射指数(anthocyanin reflectance index, ARI)。大量的研究证明ARI与植物叶片中的花青素含量显著相关(Gitelson等2001; 彭涛等2006)。Merzlyak等(2003)研究表明,改良花青素光谱反射指数(modified anthocyanin reflectance index, mARI)能够很好地反映不同品种苹果果皮中的花青素含量。

1.5 藻蓝素含量的测定

蓝藻、红藻、隐藻和某些甲藻中含有与高等植物不同的捕光色素藻胆蛋白,由藻胆素和载体蛋白共价结合而成。藻蓝素(phycoyanin, PC)是藻胆蛋白的一种,藻蓝素的提取和化学测定非常复杂。科学家们根据藻蓝素在620 nm处的吸收特征,已经建立几个用光谱反射技术来计算藻蓝素的经验公式,但是以前的几个公式在一定程度上都受藻细胞中叶绿素a含量的影响(Mishra等2009)。Mishra等(2009)通过研究叶绿素a含量对藻蓝素测定的影响,提出了不用藻蓝素最敏感波长617 nm,而用600 nm波长的光谱反射来测定藻蓝素含量,以此避免叶绿素a对藻蓝素测定的影响,同时结合藻蓝素最不敏感的700 nm波长,建立了测定藻蓝素含量的新模型。此模型在最大程度上减少了叶绿素a浓度变化对藻蓝素测定的影响,在不同的叶绿素a浓度条件下,用该模型计算的结果均与实际含量非常吻合。

2 植物营养状况监测

植物营养元素亏缺导致的各种缺素症状都会引起反射光谱的变化。光谱分析技术不仅可以无损伤、快速、准确地诊断植物个体的营养状况,而且可以从冠层水平监测大田作物的营养状况。

氮素亏缺会引起叶片颜色、厚度以及形态结构的变化,这些变化可以通过植物反射光谱的变化反映出来(Yoder和Pettigrew-Crosby 1995; Blackmer等1996)。Everitt等(1987)的研究表明,植物叶片在500~750 nm的光谱反射率与植物叶片含氮量具有很高的相关性,提出了用550~600 nm与800~900 nm反射率的比值来监测植株氮素状况。王人潮等(1993)提出诊断水稻氮素营养的光谱敏感波段为760~900 nm、630~660 nm和530~560 nm。薛利红等(2004)的研究表明,由660和460 nm两波段反射率组成的冠层植被指数[$R_{(660, 460)}=R_{660}/R_{460}$]和归一化指数[$ND_{(660, 460)}=(R_{660}-R_{460})/(R_{660}+R_{460})$]可以较好地反映小麦叶片氮含量。王磊等(2011)的研究则表明,以比植被指数($R_{\text{NIR/Red}}$)(NIR为近红外光谱760~850 nm范围内的反射光谱数据平均值,Red为红光光谱650~670 nm范围内的反射光谱数据平均值)为基础建立的氮素诊断模型能够可靠稳定地反映玉米的氮素营养状况。叶片含氮量的特征光谱因植物不同、生育期不同以及试验条件不同而有所差异,因此在用光谱分析技术研究特定植物氮素营养时,要根据研究的对象和条件,建立适合该植物氮素营养的光谱特征指数。

磷和钾对于植物光谱特征的影响不如氮素明显,关于植物中磷和钾与光谱特性的研究较少。任红艳等(2008)认为在磷营养胁迫下,冬小麦对近红外区间(760~1 100 nm)光谱反射特征的区分能力要强于可见光区;朱西存等(2009)研究了光谱反射率与苹果花磷素含量间的关系,并初步建立了苹果花磷素含量的监测模型;易时来等(2010)研究了施用不同钾肥后,锦橙叶片的光谱反射与叶片中钾含量的关系,建立了锦橙叶片钾含量的回归模型。磷和钾影响植物光谱特征变化的内在生理因素尚未研究清楚,因此要阐明植物体内磷和钾含量与反射光谱特征的关系,尚需做更深入的研究。

3 植物水分含量的测定

水分子和其他分子中的O-H键的伸缩和弯曲

振动是引起植物在近红外区域吸收电磁辐射的决定性因素, 吸收的峰值分别位于970、1 145、1 400和1 940 nm (Curran 1989)。Peñuelas等(1997)的研究表明, 可用水分指数(water index, $WI=R_{900}/R_{970}$)监测小麦的水分状况, WI可灵敏地反映叶片水势、气孔导度和细胞壁弹性(Peñuelas等1996)。王纪华等(2000)研究表明, 小麦叶片含水量与1 650~1 850 nm处的光谱吸收呈显著负相关。宋小宁和赵英时(2004)通过对内蒙古草地的研究, 提出1 240 nm为草原植被水分吸收带, 此处光谱特征峰对植被水分变化非常敏感, 而860 nm处的光谱特征峰对植被水分变化非常不敏感, 他们用这两个波段建立了归一化水分植被指数[$NDWI=(R_{860}-R_{1240})/(R_{860}+R_{1240})$]。Suplick-Ploense等(2011)研究表明, 可以根据草坪草在红光区和近红外区的特征光谱的反射率来监测草坪草的水分状况, 从而有效地指导草坪的灌溉和管理。

4 植物光合能力和光能利用效率的分析

Peñuelas等(1995b)通过田间和室内试验证明植物PRI和PSII实际光化学效率(Φ_{PSII})的变化趋势一样, 可以用来反映叶片的光能利用效率。Gamon等(1997)证明PRI可以很好地反映不同植物在不同营养水平和生育期条件下的光能利用效率。我们用光谱反射技术研究了光、温变化对苹果果皮 Φ_{PSII} 、热耗散能力(NPQ)和PRI的影响, 结果表明PRI与 Φ_{PSII} 呈显著的正相关、与NPQ呈显著负相关(孙山等2009a)。Stylinski等(2002)的研究表明PRI可以反映常绿植物光合活性随季节的变化。Peñuelas等(2004)对木樨科一种植物*Phillyrea angustifolia* L.的研究表明PRI与叶片的光合速率呈线性相关, $R^2=0.92$ 。彭涛等(2009)对一串红(*Salvia splendens* Ker. -Gswl.)和白车轴草(*Trifolium repens* L.)的研究表明, 无论在叶片水平还是冠层水平上PRI均能非常好地反映植物叶片光合机构对光能的利用效率。光谱分析技术不仅可以在叶片水平上研究植物对光能的利用能力, 而且可以在冠层和景观尺度上研究农田、草原和森林冠层的光能利用效率(吴朝阳和牛铮2008), 也可以研究不同形状和体积的植物果实的光能利用效率(孙山2009, 孙山等2009a), 弥补了光合作用测定仪在这方面的不足。

5 光质分析

在保护地生产中, 人们需要知道不同颜色的地膜对不同波长光的透光率以探讨光质对植物生长发育、形态建成、产量及品质的影响。此外, 在林业生产和森林生态研究中, 人们也需要知道不同类型的树林冠层底部的光谱组成和不同波长的光透过冠层的数量。光谱仪可以测定各种不同物质遮光条件下植物光谱的组成。应用光谱技术可以研究植被冠层不同位置或不同遮光条件下的光质构成; 也可用于研究不同颜色地膜对光质的影响, 从而有效地指导保护地栽培。张瑞华等(2007)利用光谱技术研究了有色膜覆盖对生姜叶片色素含量及光合作用的影响。结果表明绿色地膜处理能够减少叶绿体对光能的过度吸收, 降低过剩光能引发的光抑制, 显著提高姜叶片光合速率。

要想定量测定有色地膜、森林冠层或其他物质遮光对特定波长范围内光透过率的影响, 只需测出自入射光光谱和其他物质遮光后的透射光光谱, 进行相应的计算便得出特定波长范围内光透过率。例如, 图2展示了不同颜色地膜遮光后光谱组成的变化。要想计算红色地膜对太阳光中500~600 nm范围的透光率, 将红色地膜透射光谱在500~600 nm范围数值之和($T_{500-600}$)除以太阳光谱在500~600 nm范围内数值之和($S_{500-600}$), 即: $T_{500-600}/S_{500-600} \times 100\% = 22.5\%$, 便得出该红色地膜在500~600 nm范围的透光率为22.5%。

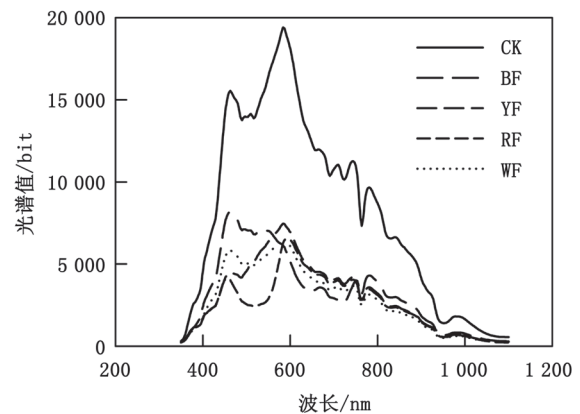


图2 不同颜色地膜遮光后透射光谱组成的变化

Fig.2 Changes of spectrum after shading by films with different colors

CK: 太阳光; BF: 蓝色地膜; YF: 黄色地膜; RF: 红色地膜; WF: 白色地膜。

6 植被盖度和生态系统中CO₂和H₂O通量分析

由于NDVI可以避免大部分仪器定标、太阳角、地形、云阴影、辐射和大气等条件变化的影响,增强了对植被的响应能力,因此NDVI是目前应用最广的一种植被指数,在植被盖度评价、作物识别和作物产量预报等资源环境遥感中有着广泛的应用。现在已经将NDVI作为大尺度监测植物群体和生态系统发展的重要指标,NDVI与生物量、叶面积、光能利用率、光合生产力等(Gamon等1995, 2006; Boelman等2003)具有很好的相关性;另外,NDVI可以反映生态系统中的CO₂和H₂O通量,与生态系统初级生产力有很好的相关性(Running等1999; Boelman等2003),可以作为研究大气-生态系统碳循环的重要手段。Boelman等(2003)研究表明莎草苔原(wet sedge tundra)生态系统在经过长期高温和施肥处理后,NDVI和地上生物量、生态系统初级生产力和生态系统呼吸具有显著的相关性。Gamon等(2006)为了观察不同干扰条件对南加利福尼亚州的丛林生态系统的影响,将光谱仪安置在特制的轨道车(tram system)上,对该地区的NDVI数据进行了连续5年自动监测,结果显示NDVI能够准确地反映不同天气状况、季节和环境干扰等对丛林生态系统植被盖度的影响。Gray等(2010)利用光谱分析法研究了CO₂和O₃倍增对大豆生长的影响,结果表明比植被指数R_{NIR/Red}与大豆冠层

的叶面积指数呈显著的线性相关。Fuentes等(2006)利用光谱反射创建的模型,成功地制备了在干旱和火灾等逆境干扰条件下,南加利福尼亚州半干旱地区灌木群落生态系统的CO₂和H₂O通量图,该模型预测的结果与实际测定结果非常吻合。

在野外进行植被研究时,为了避免光强变化(多云条件)对测定结果的影响,最好使用双通道光谱仪(如Unispec DC),这是因为双通道光谱仪的一根光纤与余玄接收器相连垂直指向天空,随时测定入射光的光强;另一根光纤与视角镜相连置于植物冠层上方,测定植物冠层的反射光谱,这样光谱仪便能随时对入射光强的变化进行校正,使测定结果不受光强变化的影响(彭涛等2009)。

7 光谱分析在其他方面的应用

光谱分析除了在分析和测定植物的色素含量、营养状况、植被盖度、水分状况、光能利用率以及CO₂通量等方面的应用,还广泛用于作物长势(张瑞美等2006)和环境污染监测(迟光宇等2005)等方面(图3)。我们近期的研究表明,光谱分析技术可以长期动态监测不同酸雨处理(薛忠财等2011a)和不同施肥条件(薛忠财等2011b)对小麦生长和营养状况的影响。此外,由于污水进入江河、湖泊后,引起水体富营养化,导致淡水水体中藻类大量繁殖,产生水华(也称藻华),严重影响了水质,对水产养殖和人畜健康都带来危害。因此



图3 光谱分析在植物生理生态研究中的应用示意图

Fig.3 Abridged general view of application of spectral reflectance on research of plant eco-physiology

对于水华的发生、分布和监测的研究是近些年来生态工作者非常关注的问题。大量研究表明, 光谱反射技术是监测水华发生、分布和组成的最有效手段。Alikas等(2010)利用卫星搭载的中等分辨率成像光谱仪(MERIS)数据研究了俄罗斯和爱沙尼亚两个大型湖泊中水华在不同季节里的动态变化, 证明了光谱反射数据中的最大叶绿素指数(MCI)能够很好地反映在复杂水体中水华的动态变化。李俊生等(2009)利用高光谱分析技术建立了区分太湖水域中水华、浮叶植物、沉水植物和水体的判别公式, 利用这些公式能够很好地识别水华和水草, 获得了较高的识别精度。另外, 利用光谱分析技术可以估测作物的籽粒品质(刘芸等2008)、监测重金属(任红艳等2010)、病虫害(Naidu等2009; 孙启花和刘向东2010)以及放牧(Fan等2011)对植物生长的影响。

8 研究展望

随着光谱分析在植物生理生态中的应用, 实时、快速、无损伤地监测植物的营养状况和生理状态已经成为可能, 但是一直很难满足人们对精确度的要求, 所以未来的研究将主要集中在以下几个方面: 通过有效波段的提取、建立光谱指数与植物生理生态指标的相关性; 修正已有模型, 提高已有模型的精确度; 根据光谱分析的原理开发新的植物诊断仪器; 将光谱分析更好地用于指导农业、林业和草业的生产, 促进数字化农业的发展。

参考文献

- 迟光宇, 刘新会, 刘素红, 杨志峰(2005). 环境污染监测中的植物光谱效应研究. *环境科学与技术*, 28 (增刊): 16~19
- 李俊生, 吴迪, 吴远峰, 刘海霞, 申茜, 张浩(2009). 基于实测光谱数据的太湖水华和水生高等植物的识别. *湖泊科学*, 21 (2): 215~222
- 刘芸, 唐延林, 黄敬峰, 蔡绍洪, 楼佳(2008). 利用高光谱数据估测水稻米粉中粗蛋白粗淀粉和直链淀粉含量. *中国农业科学*, 41 (9): 2617~2623
- 彭涛, 李鹏民, 贾裕娇, 高辉远(2006). 介绍两种无损伤测定植物活体叶色素含量的方法. *植物生理学通讯*, 42 (1): 83~86
- 彭涛, 姚广, 李鹏民, 王未未, 孙山, 赵世杰, 高辉远(2009). 植物叶片和冠层光化学反射指数与叶黄素循环的关系. *生态学报*, 29 (4): 1987~1993
- 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 邱冬生, 张佳宝(2008). 磷营养胁迫对冬小麦冠层光谱的影响. *土壤通报*, 39 (6): 1326~1330
- 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 史学正, 施润和, 王洪杰(2010). 重金属污染水稻的冠层反射光谱特征研究. *光谱学与光谱分析*, 30 (2): 430~434
- 宋小宁, 赵英时(2004). 应用MODIS卫星数据提取植被—温度—水分综合指数的研究. *地理与地理信息科学*, 20 (2): 13~17
- 孙启花, 刘向东(2010). 褐飞虱危害在水稻植株光谱反射率上的表现. *中国水稻科学*, 24 (2): 203~209
- 孙山(2009). 苹果绿色果皮光合生理特性及果皮灼伤机制的研究 [博士论文]. 山东泰安: 山东农业大学
- 孙山, 张立涛, 高辉远, 束怀瑞, 王来平(2009a). 晴天条件下光、温变化对苹果绿色果皮原初光化学反应的影响. *应用生态学报*, 20 (10): 2431~2436
- 孙山, 张立涛, 杨兴华, 高辉远(2009b). 板栗幼叶展叶过程的反射光谱和叶绿素荧光动力学. *林业科学*, 45 (4): 162~166
- 王纪华, 赵春江, 郭晓维, 黄文江, 田庆久(2000). 利用遥感方法诊断小麦叶片含水量的研究. *华北农学报*, 15 (4): 68~72
- 王磊, 白由路, 卢艳丽, 王贺, 杨俐苹(2011). 基于光谱分析的玉米氮素营养诊断. *植物营养与肥料学报*, 17 (2): 333~340
- 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显(1993). 水稻遥感估产的农学机理研究. I. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择. *浙江农业大学学报*, 19 (增刊): 7~14
- 吴朝阳, 牛铮(2008). 光化学植被指数估算植物光能利用率的研究进展. *植物生态学报*, 32 (2): 734~740
- 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 张宪(2004). 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究. *植物生态学报*, 28 (2): 172~177
- 薛忠财, 高辉远, 刘鹏, 柳洁(2011a). 利用冠层和叶片水平的反射光谱研究模拟酸雨对小麦的影响. *农业环境科学学报*, 30 (2): 228~235
- 薛忠财, 高辉远, 柳洁, 宁堂原, 田慎重, 王瑜(2011b). 利用光谱反射技术监测不同地力和施肥条件下小麦生长和产量的变化. *麦类作物学报*, 31 (2): 324~330
- 易时来, 邓烈, 何绍兰, 郑永强, 毛莎莎(2010). 锦橙叶片钾含量光谱监测模型研究. *中国农业科学*, 43 (4): 780~786
- 张瑞华, 战焜友, 徐坤(2007). 有色膜覆盖对姜叶片色素含量及光合作用的影响. *园艺学报*, 34 (6): 1465~1470
- 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增(2006). 光谱技术在农业领域的应用与展望. *节水灌溉*, (5): 1~5
- 赵世杰, 孟庆伟, 许长成, 韩红岩, 邹琦(1995). 植物组织中叶黄素循环组分的高效液相色谱分析法. *植物生理学通讯*, 31 (6): 438~442
- 朱西存, 赵庚星, 董芳, 王凌, 雷彤, 战兵(2009). 基于高光谱的苹果花磷素含量监测模型. *应用生态学报*, 20 (10): 2424~2430
- Alikas K, Kangro K, Reinart A (2010). Detecting cyanobacterial blooms in large North European lakes using the maximum chlorophyll index. *Oceanologia*, 52 (2): 237~257
- Blackburn GA (1998). Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sens Environ*, 66 (3): 273~285
- Blackmer TM, Schepers JS, Vavrel GE (1996). Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron J*, 88 (1): 1~5
- Boelman NT, Stieglitz M, Rueth HM, Sommerkorn M, Griffin KL, Shaver GR, Gamon JA (2003). Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. *Oecologia*, 135 (3): 414~421
- Chappelle EW, Kim MS (1992). Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soy-

- bean leaves. *Remote Sens Environ*, 39 (3): 239~247
- Curran PJ (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sens Environ*, 30 (3): 271~278
- Datt B (1998). Remote sensing of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, chlorophyll *a+b*, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sens Environ*, 66 (2): 111~121
- Everitt JH, Pettit RD, Alaniz MA (1987). Remote sensing of broom snake weed (*Gutierrezia sarothrae*) and spiny aster (*Aster spinosus*). *Weed Sci*, 35 (2): 295~302
- Fan L, Ketzner B, Liu H, Bernhofer C (2011). Grazing effects on seasonal dynamics and interannual variabilities of spectral reflectance in semi-arid grassland in Inner Mongolia. *Plant Soil*, 340 (1-2): 169~180
- Filella I, Peñuelas J (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Int J Remote Sens*, 15 (7): 1459~1470
- Fuentes DA, Gamon JA, Cheng Y, Claudio HC, Qiu H, Mao Z, Sims DA, Rahman AF, Oechel W, Luo H (2006). Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. *Remote Sens Environ*, 103 (3): 312~323
- Gamon JA, Cheng Y, Claudio H, Mackinney L, Sims DA (2006). A mobile tram system for systematic sampling of ecosystem optical properties. *Remote Sens Environ*, 103 (3): 246~254
- Gamon JA, Field CB, Goulden ML, Griffin KL, Hartley AE, Joel G, Peñuelas J, Valentini R (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecol Appl*, 5 (1): 28~41
- Gamon JA, Peñuelas J, Field CB (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens Environ*, 41 (1): 35~44
- Gamon JA, Serrano L, Surfus JS (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112 (4): 492~501
- Gamon JA, Surfus JS (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytol*, 143 (1): 105~117
- Gitelson AA, Merzlyak MN (1994). Spectral reflectance changes associate with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J Plant Physiol*, 143 (3): 286~292
- Gitelson AA, Merzlyak MN, Chivkunova OB (2001). Optical properties and non-destructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochem Photobiol*, 74 (1): 38~45
- Gray SB, Dermody O, DeLucia EH (2010). Spectral reflectance from a soybean canopy exposed to elevated CO₂ and O₃. *J Exp Bot*, 61 (15): 4413~4422
- Merzlyak MN, Gitelson AA, Pogosyan SI, Chivkunova OB, Lehimena L, Garson M, Buzulukova NP, Shevyreva VV, Rumyantseva VB (1997). Reflectance spectra of leaves and fruits during their development and senescence and under stress. *Russ J Plant Physiol*, 44 (5): 707~716
- Merzlyak MN, Gitelson AA, Chivkunova OB, Rakitin VY (1999). Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening. *Physiol Plant*, 106 (1): 135~141
- Merzlyak MN, Solovchenko AE, Gitelson AA (2003). Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. *Postharvest Biol Technol*, 27 (2): 197~211
- Mishra S, Mishra DR, Schluchter WM (2009). A novel algorithm for predicting phycocyanin concentrations in cyanobacteria: a proximal hyperspectral remote sensing approach. *Remote Sens*, 1 (4): 758~775
- Naidu RA, Perry EM, Pierce FJ, Mekuria T (2009). The potential of spectral reflectance technique for the detection of *Grapevine leafroll-associated virus-3* in two red-berried wine grape cultivars. *Comput Electron Agric*, 66 (1): 38~45
- Peñuelas J, Baret F, Filella I (1995a). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll *a* ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31 (2): 221~230
- Peñuelas J, Filella I, Gamon JA (1995b). Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol*, 131 (3): 291~296
- Peñuelas J, Filella I (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends Plant Sci*, 3 (4): 151~156
- Peñuelas J, Filella I, Sweeano L, Save R (1996). Cell wall elasticity and water index (R900 nm/R970 nm) in wheat under different nitrogen availabilities. *Int J Remote Sens*, 17 (2): 373~382
- Peñuelas J, Munné-Bosch S, Llusia J, Filella I (2004). Leaf reflectance and photo- and antioxidant protection field-grown summer-stressed *Phillyrea angustifolia*. Optical signals of oxidative stress? *New Phytol*, 162 (1): 115~124
- Peñuelas J, Piñol J, Ogaya R, Filella I (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *Int J Remote Sens*, 18 (13): 2869~2875
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Freden SC, Mercanti EP, Becker MA (eds). *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. Washington, DC: NASA Science and Technology Information Office, 301~317
- Running SW, Baldocchi DD, Turner DP, Gower ST, Bakwin PS, Hibbard KA (1999). A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sens Environ*, 70 (1): 108~127
- Sims DA, Gamon JA (2002). Relationships between leaf content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens Environ*, 81 (2-3): 337~354
- Stylinski CD, Gamon JA, Oechel WC (2002). Seasonal patterns of reflectance indices, carotenoid pigments and photosynthesis of evergreen chaparral species. *Oecologia*, 131 (3): 366~374
- Suplick-Ploense MR, Alshammary SF, Qian YL (2011). Spectral reflectance response of three turfgrasses to leaf dehydration. *Asian J Plant Sci*, 10 (1): 67~73
- Thomas JR, Gausman HW (1977). Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. *Agron J*, 69 (5): 799~802
- Van Gaalen KE, Flanagan LB, Peddle DR (2007). Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and spectral reflectance in *Sphagnum* moss at vary water contents. *Oecologia*, 153 (1): 19~28
- Yoder BJ, Perttigrw-Crosby RE (1995). Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sens Environ*, 53 (3): 199~211