

文章编号: 1007 4619(2006)01 0130-08

利用夫琅和费暗线探测自然光条件下的 植被光合作用荧光研究

刘良云, 张永江, 王纪华, 赵春江
(国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089)

摘要: 自然光照条件下测定的植被反射的辐照度光谱既包括太阳光诱导荧光的发射光谱, 又包括叶片对入射光的反射光谱, 研究如何从冠层光谱中提取荧光光谱有十分重要的应用价值。首先, 论文介绍了夫琅和费暗线探测自然光条件下的光合作用荧光的基本原理和方法。其次, 将太阳大气的夫琅和费暗线拓展到地球大气, 发现地物光谱仪测定的冠层辐照度光谱中 688nm 和 760nm 两个氧气吸收形成的夫琅和费暗线特征明显, 且荧光较强, 所以利用这两个波段的夫琅和费暗线可以探测自然光条件下的光合作用荧光。第三, 研究并分析了夫琅和费暗线方法计算的 688nm 和 760nm 波段的荧光特性, 结果表明该方法计算的荧光是可靠的, 它与光合有效辐射 (PAR) 关系密切, 复相关系数达到了 0.9。冬小麦冠层荧光光谱在 760nm 和 688nm 波段的荧光大小基本相等, 而地锦冠层荧光光谱在 688nm 波段的荧光强度是 760nm 的 3 倍左右, 表明荧光光谱能够更加敏感地反映植被物种或生理生化状况的差别。最后, 将夫琅和费暗线方法计算的 688nm 和 760nm 波段的荧光数据与激光脉冲调制荧光仪测定 F_v 、 F_m 荧光参数进行了统计分析, 结果表明它与 F_v 、 F_m 存在极显著的负相关关系。所以利用夫琅和费暗线方法能够探测植被冠层荧光, 并有可能替代传统的测定方法, 并推广到航空航天平台, 实现荧光探测从接触式点测量方式到航空或卫星遥感大面积监测的技术飞跃。

关键词: 荧光; 夫琅和费暗线; 光谱; 光合作用
中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Detecting Photosynthesis Fluorescence under Natural Sunlight Based on Fraunhofer Line

LIU Liang-yun, ZHANG Yong-jiang, WANG Ji-hua, ZHAO Chun-jiang
(National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China)

Abstract The amount of chlorophyll fluorescence emitted by a leaf or canopy under natural sunlight is difficult to quantify because the signal is obscured by the reflected light. Firstly, the principle and method of separating the fluorescence emissive signal from canopy radiance spectrum based on Fraunhofer line was introduced. Secondly, the Solar Fraunhofer line was linked to the molecular oxygen absorption by the terrestrial atmosphere at 688nm and 760nm. The two Fraunhofer lines at 688nm and 760nm are obvious in the radiance spectra by ASD FieldSpec Pro NIR spectrometer which largely overlap the chlorophyll fluorescence emission spectrum of leaves. Therefore, the two Fraunhofer lines at 688nm and 760nm could be selected to detect the emissive fluorescence. Thirdly, the statistical correlative coefficients (R^2) between PAR and emissive fluorescence of winter wheat and *Parthenocissus tricuspidata* at 688nm and 760nm reach 0.9. The emissive fluorescence of winter wheat at 688nm equals to that at 760nm, the emissive fluorescence of *Parthenocissus tricuspidata* at 688nm is 3 times larger than that at 760nm. Compared with canopy reflectance spectrum,

收稿日期: 2004-07-05 修订日期: 2004-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40301035) 和北京市自然科学基金项目 (4042014) 资助。

作者简介: 刘良云 (1975—), 男, 副研究员, 2000 年于中国科学院西安光机研究所获博士学位。现主要从事光学遥感及应用研究。

fluorescence spectrum is more sensitive to species and plant stress conditions. Finally, the emissive fluorescence at 688nm and 760nm was related to F_v , F_m by a OSF-FL modulated chlorophyll fluorimeter; the correlative coefficients are highly significant at 0.999 confident level, which means that the emissive fluorescence calculated from the two Fraunhofer lines at 688nm and 760nm could replace the modulated chlorophyll fluorimeter method and be applied to airborne remote sensing.

Key words fluorescence; Fraunhofer line; spectra; photosynthesis; remote sensing

1 引言

光合作用是提供植物所有物质代谢和能量代谢的基础,它包括一系列光物理、光化学和生物化学转变的复杂过程,在光合作用的原初反应,将吸收光能传递、转换为电能的过程中,有一部分光能损耗以较长波长的荧光方式释放(通常不到 1% 的入射能量)。

研究和探测这种自然条件下光合作用的荧光特性有十分重要的科学意义和应用价值。首先,自然条件下的叶绿素荧光和光合作用有着十分密切的关系。一方面,当植物被暴露在过强的光照条件下,荧光起着十分重要的保护作用,避免叶绿体吸收光能超过光合作用的消化能力,将强光灼伤的损失降低到最小;另一方面,一般来说,自然条件下叶绿素荧光和光合速率是相互负关联的,光合速率较高,则荧光较弱,反之亦然^[1-3]。所以通过探测叶绿素荧光,可以间接了解植物的光合作用。其次,作为植物健康状况的“探针”,自然条件下光合作用荧光特性与植物的营养和受胁程度密切相关^[4-6]。因此,通过植物光合作用的荧光特性探测可以了解植物的生理、生长、病害及受胁状态。

自然条件下光合作用荧光信号与叶片的反射光谱信号是叠加在一起的, Gamon 等、Zarco-Tejada 等研究表明,尽管叶片光合作用荧光难以定量探测,但其对冠层表观反射率是有一定贡献的^[7,8]。MaFarlane 等、Carter 等分别利用太阳光谱的 H- α Fraunhofer 线(656nm)和氧气吸收 Fraunhofer 线(686.7nm),设计了荧光探测仪器,并测量了柑橘、葡萄等植物冠层的光合作用荧光,但缺乏实验数据验证^[4,9]。Gamon 等、Zarco-Tejada 等利用光谱反射率,通过经验统计分析的方法,设计与光合作用或荧光相关的光谱指数和模型,但这些模型和方法主要探测及评价的荧光是激光诱导荧光,而不是自然光诱导的光合作用荧光^[7,10,11],且都为经验性统计模型,外延性较差。

本文利用地物光谱仪测定的植被辐照度光谱数

据,利用其在地球大气中氧气吸收形成的 688nm 和 760nm 两个“夫琅和费暗线”的光谱特征,成功探测了太阳光诱导的光合作用荧光,验证了夫琅和费暗线探测叶绿素荧光的方法,提供了一种新的叶绿素荧光的被动探测技术方法,它有可能代替目前主动激光荧光探测方法,并应用于机载或星载的植被被动荧光遥感监测。

2 材料与试验

2.1 试验对象

设计了两种试验,获取单子叶(冬小麦)和双子叶(地锦)植被的冠层光谱、激光激发荧光、PAR、温度等环境参数及其日变化数据。

试验一:2004-05-13 在北京农林科学院农场进行,选定冬小麦为对象,小麦品种为京冬 8 号,此时小麦处于灌浆初期。挑选正常肥水管理、且长势均匀的实验小区,覆盖度将近 100%。

试验二:2004-05-24 在北京农林科学院农场进行,选定地锦(别名为爬山虎)为对象。所选地锦植被群体茂盛(100%覆盖)、均匀、平坦。

2.2 田间光谱测定

利用三角架固定一水平悬杆,光谱仪探头固定在悬杆另一端并垂直向下观测,光谱仪探头距植被冠层 1.3m。冠层光谱测量采用 ASD FieldSpec Pro NIR 光谱仪,该光谱仪的采样间隔为 1.4nm,光谱范围为 350-1050nm,光谱分辨率为 3nm,光谱仪视场角 25°。采用 0.25m × 0.25m 的 BaSO₄ 灰板作为参考板,参考板在可见近红外波段的光谱反射率为 30% 左右。植被光谱测定采用辐射亮度(Radiance)观测模式,测定冠层反射的辐照度光谱,在视场范围内重复 10 次取平均值作为冠层反射的辐照度光谱,并在植被辐照度光谱测定前后,测定参考板反射的辐照度光谱。并将测定的参考板反射的辐照度光谱除以参考板光谱反射率,得到太阳到达植被冠层的辐照度光谱。

两次试验的天气晴朗, 风速较小 (0—1 m/s), 从 9:30—18:00 每隔半小时测定一次植被和参考板的冠层辐照度光谱。

2.3 植被激发荧光测定

采用 OptiSciences 公司的 OS1-FL 激光脉冲调制式荧光仪, 在观测植被群体中挑选有代表性的 10 个叶片, 并将荧光测定的暗适应夹在叶片中部, 暗适应 20 min 后测定其激光激发的叶绿素荧光参数, 包括原初荧光 F_0 、最大荧光 F_m 和最大可变荧光 F_v 。从 9:30—17:30 每隔 1 小时, 并与冠层光谱测定同步, 测定荧光, 取 10 片叶的平均值作为植被群体的激光激发的叶绿素荧光。

2.4 田间微气象数据获取

将 DAVIS 田间微气象站安放在实验地块旁边, 试验过程中每隔 5 min 自动记录一套田间微气象数据, 包括温度、湿度和风速等。此外, 冠层辐照度光谱测定同时, 采用 LiCor 公司的 LI 210SA 光量子传感器, 同步测定到达地表的 400—700 nm 光谱范围内的太阳辐射, 作为植被冠层的光合有效辐射 (PAR)。

3 方法与结果

3.1 夫琅和费暗线探测自然光条件下的光合作用荧光的基本原理和方法

由于太阳大气和地球大气的吸收, 到达地表的太阳辐照度光谱中有许多细小的暗线, 称为夫琅和费暗线。这些暗线的宽度在 0.1—10 nm 之间, 其中有些暗线的中心强度比其相邻谱区低 10% 以上。这为自然光照条件下的植被荧光探测提供了可能的弥补方法^[12]。

由于自然光照条件下的短波激发的荧光光谱辐射将夫琅和费暗线的吸收“井”填充到了一定程度, 如图 1。因此, 通过比较太阳入射辐照度光谱和植被反射辐照度光谱中某个夫琅和费暗线与其相邻谱区的相对强度, 便可以探测植被冠层的荧光强度。

图 1 中 a 、 b 分别表示利用参考板测定的太阳辐照度光谱在夫琅和费暗线和相邻谱区的强度, c 、 d 分别表示植被冠层反射的辐照度光谱在夫琅和费暗线和相邻谱区的强度, λ_0 为夫琅和费暗线波长。若假定植被在夫琅和费暗线和相邻谱区的冠层光谱反射率相等 (R), 植被在夫琅和费暗线和相邻谱区的

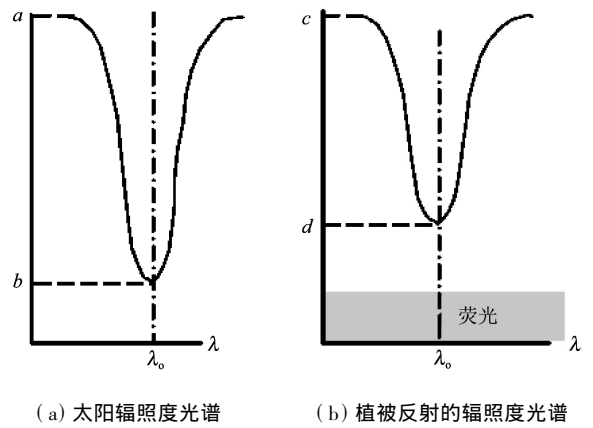


图 1 利用夫琅和费暗线探测植被荧光的原理图

Fig 1 Detecting vegetation fluorescence from Fraunhofer lines

荧光强度为 f 根据文献 [13]

$$c = R \times a + f \quad (1)$$

$$d = R \times b + f \quad (2)$$

只要测定夫琅和费暗线和相邻谱区的太阳光谱辐射强度和植被反射的光谱辐射强度 a 、 b 、 c 、 d 就可以计算植被冠层的荧光绝对强度 f 和相对强度 f/a 。

$$f = c - R \times a = (a \times d - c \times b) / (a - b) \quad (3)$$

考虑到 $R = (c - d) / (a - b)$ 冠层光谱反射率 R 与荧光无关, 而 $f = c - R \times a$, 这表明只要能够测定夫琅和费暗线波段的光谱反射率、太阳辐照度、冠层反射辐照度, 就可以测定叶绿素荧光。因此, 只要探测器的光谱分辨率和信噪比足够高, 利用夫琅和费暗线探测到的荧光 f 与夫琅和费暗线的宽度、深度、形状无关。该方法探测的叶绿素荧光可以忽略地球氧气吸收对下行辐射传输的影响, 本文也没有考虑日变化试验中的地球氧气吸收对夫琅和费暗线的影响。

3.2 夫琅和费暗线的波段选择

自然光照条件下, 测定的植被反射的辐照度光谱既包括对太阳光诱导的光合作用荧光的贡献 (叶片发射光谱强度), 又包括叶片对入射光的反射光谱强度。其中太阳光诱导荧光是发射光谱, 与植物光合作用能力、胁迫状况、生理状况相关, 而叶片反射光谱则包含叶片生化组分对入射光线的吸收信息。由于荧光发射光谱和植被冠层反射光谱是混合在一起的, 且光谱仪的光谱分辨率和信噪比的限制, 所以利用夫琅和费暗线探测植被荧光的波段选择十分重要。

夫琅和费暗线的波长主要有 486 nm, 527 nm, 589 nm, 656 nm, 688 nm, 760 nm, 如果探测器的光谱分辨率和信噪比足够高, 是有可能探测到夫琅和费暗

线的。由于太阳大气吸收的夫琅和费暗线宽度不到 1nm, 而 ASD FieldSpec Pro NIR 光谱仪的光谱分辨率为 3nm, 所以该光谱仪不能探测太阳大气的夫琅和费暗线特征。图 2 为利用 Modtran 4.0 模拟北半球中纬度区域、夏季、晴空条件下的地球大气和氧气透过率曲线 (光谱分辨率为 10cm^{-1}), 结果表明 688nm 和 760nm 波段的夫琅和费暗线的半高宽分

别为 4nm 和 7nm。因此, 利用 ASD FieldSpec Pro NIR 光谱仪是完全有可能探测到 688nm 和 760nm 两个地球氧气吸收形成的夫琅和费暗线特征。图 3 为 5 月 24 日利用 ASD 地物光谱仪测定的太阳入射和地锦植被冠层反射的辐照度光谱曲线, 验证了该光谱仪能够探测到 688nm 和 760nm 两个地球氧气吸收形成的夫琅和费暗线特征。

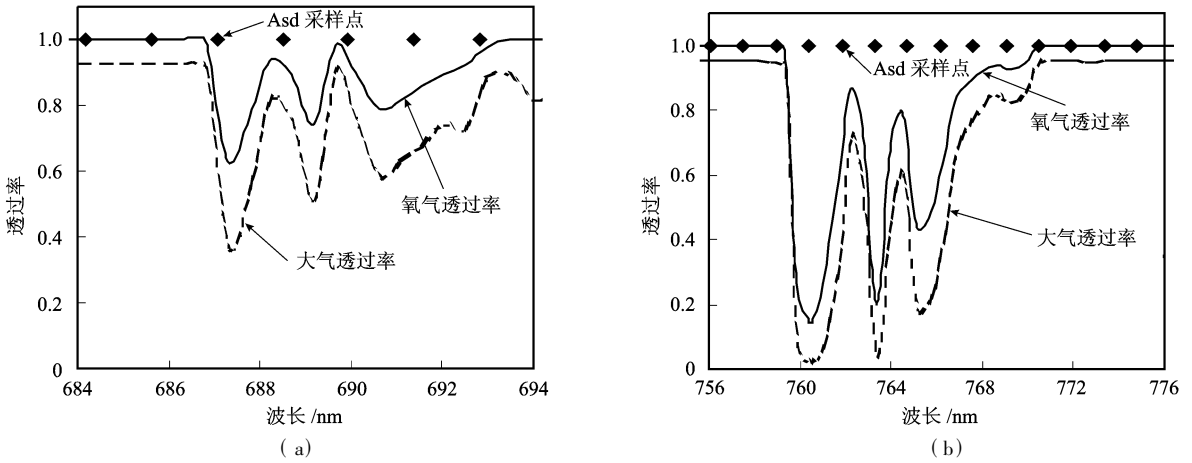


图 2 688nm 和 760nm 附近氧气吸收特征的透过率

Fig 2 The two Fraunhofer lines of the terrestrial oxygen absorption at 688nm and 760nm

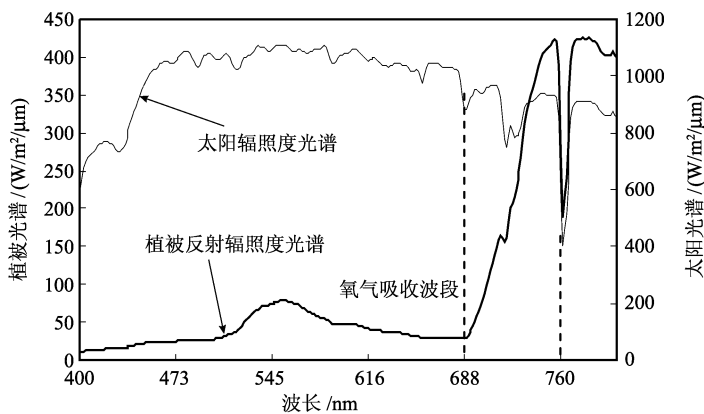


图 3 光谱仪测定的太阳入射和地锦植被冠层反射地辐照度光谱

Fig 3 Solar irradiance spectrum and vegetation radiance spectrum by ASD spectrometer

利用大气传输模型模拟的 688nm 和 760nm 的 O_2 吸收光谱特征与光谱分辨率有关, 图 2 为采用 10cm^{-1} 分辨率模拟结果, 若采用更高分辨率 (如 2cm^{-1}), 吸收特征出现更多谱线。由于 ASD 光谱仪采样间隔 1.4nm (688nm 处的分辨率为 30cm^{-1}), 所以图 3 中测定的辐照度光谱中没有图 2 中的 3 条谱线。

图 4 为典型的植被光谱反射率曲线和 355nm 激光激发的荧光光谱曲线。荧光激发光谱在蓝绿光 (450nm)、红光 (685nm)、远红光 (730nm) 波段存在 BGF、RF、NIRF 3 个荧光峰。从图 3 和图 4 可见,

688nm 和 760nm 两个氧气吸收形成的夫琅和费暗线特征明显, 且荧光较强, 所以利用这两个波段的夫琅和费暗线, 并结合公式 (3) 就可以计算太阳光诱导的光合作用荧光。

3.3 利用夫琅和费暗线计算自然光照条件下的植被荧光

相同外界环境条件下的光合作用荧光主要反映植被胁迫状况, 但对于无肥水、病虫害等逆境胁迫的正常植被群体, 环境条件对荧光强度有较大影响, 其

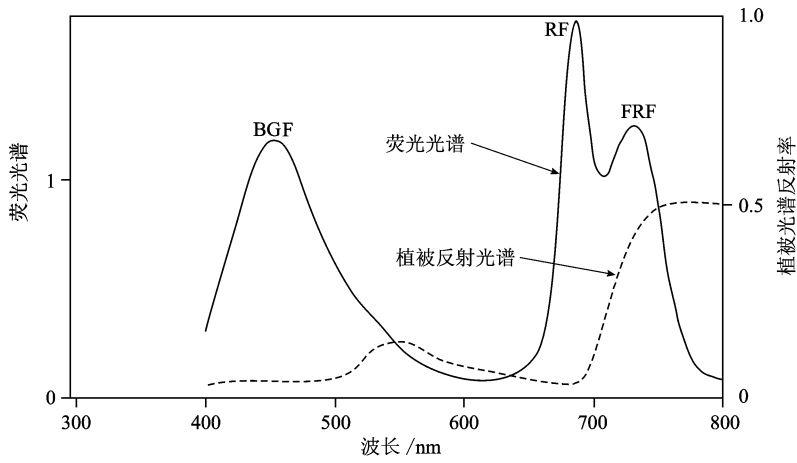


图 4 典型植被光谱和紫光 (355nm) 激发的荧光光谱

Fig 4 Vegetation spectral reflectance and fluorescence emission spectrum excited at 355nm

中光强和温度条件对荧光强度影响最大。试验日天气晴朗, 温度、风速等气象条件比较稳定, 其中 5 月 13 日 10: 00—18: 00 PAR 变化范围是 15380—98180L_x, 温度变化范围是 25—30℃, 风速 0—2.5m /s, 5 月 24 日 9: 30—18: 00 PAR 变化范围是 8250—85100L_x, 温度变化范围是 26—33℃, 风速 0—3m /s。

试验观测对象不变, 环境条件的变化决定了植被荧光的日变化, 由于温度、湿度变化幅度较小, 且植被荧光对光照条件比较敏感, 光合有效辐射的日变化主要决定了植被荧光变化情况, 因此利用植被荧光与 PAR 的统计关系可以检验利用夫琅和费暗线方法计算荧光的可靠性。

根据公式 (3), 利用 5 月 13 日测定的冬小麦和 5 月 24 日测定的地锦的植被反射辐照度光谱和太阳入射的辐照度光谱, 就可以计算 760nm, 688nm 波段的太阳光诱导荧光强度。在利用公式 (3) 计算荧光时, 688nm 吸收特征选用 Asd 光谱仪 687.3nm 波

段作为 O₂ 吸收谷, 684.0nm 波段作为参考波段; 760nm 吸收特征选用 Asd 光谱仪 760.5nm 波段作为 O₂ 吸收谷, 756.1nm 波段作为参考波段。由于利用夫琅和费暗线探测到的荧光与夫琅和费暗线的宽度、深度、形状无关, 所以利用 Asd 光谱仪测定光谱数据反演的荧光参数可以认为是 Asd 光谱仪光谱采样间隔的平均值。

图 5(a), (b) 分别为两次实验测定的冬小麦和地锦在 760nm, 688nm 波段的荧光及 PAR 的日变化曲线。图 5 中可以发现, 晴朗天气条件下的太阳光诱导的荧光随时间的日变化呈单峰特性, 并在中午 13: 00 左右达到高峰; 太阳光诱导荧光与光合有效辐射 (PAR) 的日变化规律十分吻合; 冬小麦 (单子叶植物) 和地锦 (双子叶植物) 的冠层荧光光谱特性有较大的差异, 其中冬小麦冠层荧光光谱在 760nm 和 688nm 波段的荧光大小相近, 而地锦冠层荧光光谱在 688nm 波段的荧光大小是 760nm 波段的 3 倍

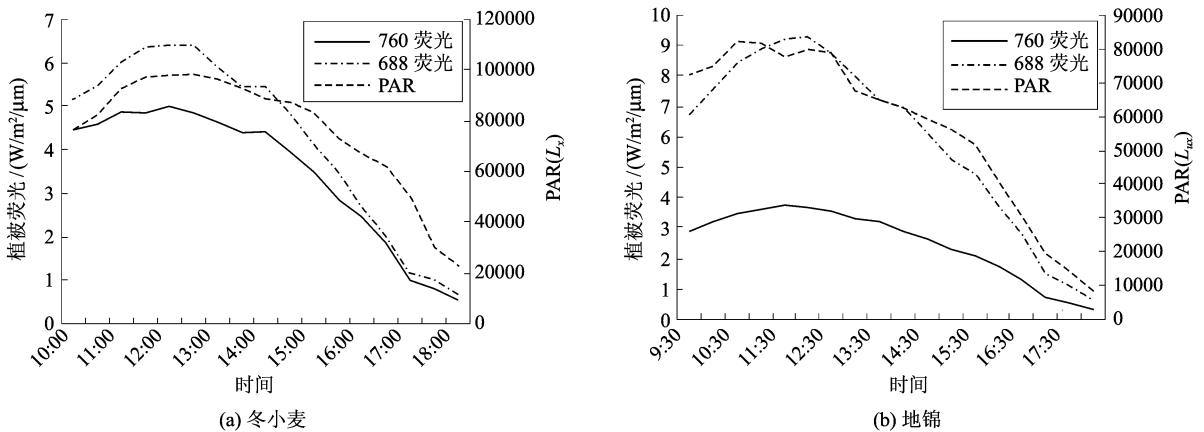


图 5 760nm、688nm 波段的荧光及 PAR 的日变化曲线

Fig 5 The daily changes of PAR and solar induced fluorescence at 760nm and 688nm

左右。这说明: 与植被冠层反射率光谱相比较, 叶绿素荧光光谱能够更加敏感地反映植被物种或生理生化状况的差别。

图 6 为利用夫琅和费暗线方法计算的冬小麦冠层在 688nm 和 760nm 波段的荧光强度与 PAR 的统计散点图, 图 7 为地锦冠层在 760nm, 688nm 波段的荧光强度与 PAR 的统计散点图。结果表明: 自然光照条件下的植被荧光与 PAR 密切相关, 复相关系数达到了 0.9 以上。

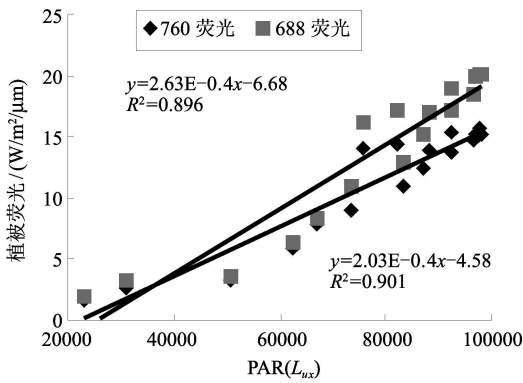


图 6 760nm, 688nm 波段的冬小麦荧光与 PAR 统计关系
Fig 6 Relating PAR to solar induced fluorescence of winter wheat at 760nm and 688nm (n=17)

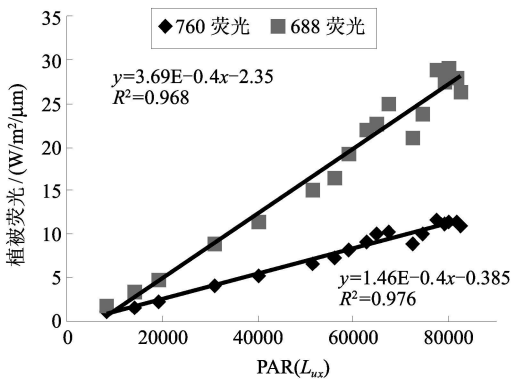


图 7 760nm, 688nm 波段的地锦荧光与 PAR 统计关系
Fig 7 Relating PAR to solar induced fluorescence of Parthenocissus tricuspidata at 760nm and 688nm (n=18)

利用夫琅和费暗线方法不仅能够探测植被冠层荧光的绝对强度 f 还能够计算荧光的相对强度 f/a_c 。图 6 和图 7 的结果表明, 在观测对象不变条件下, PAR 的变化决定了植被冠层的荧光绝对强度。若进一步对荧光相对强度与 PAR 进行统计相关分析, 结果表明: 冬小麦冠层在 688nm 和 760nm 的相对荧光强度与 PAR 正相关, 且复相关系数分别为 0.842 和 0.927; 地锦冠层在 688nm 和 760nm 的相对荧光

强度与 PAR 正相关, 且复相关系数分别为 0.823 和 0.743。这正好验证了荧光对植被的保护作用, 即光照较强时, 荧光相对增强, 从而避免叶绿体吸收光能超过光合作用的消化能力, 并将强光灼伤的损失降低到最小。

激光脉冲调制荧光仪能够测定荧光动力学参数, 包括原初荧光 F_o 、最大荧光 F_m 和最大可变荧光 F_v , 其中 F_v/F_m 比值称为 PS II 的原初光能转化学效率, 是研究光合结构生理状态重要的参数。在非逆境条件下, 不同种类或生态型的叶的 F_v/F_m 比值变动范围为 0.80—0.83 之间, 但在逆境条件下, 这一比值显著降低。

为了进一步验证利用夫琅和费暗线方法探测植被冠层荧光的实用性, 将夫琅和费暗线方法探测的植被冠层荧光与激光脉冲调制荧光仪能够测定的 F_v/F_m 荧光参数进行了统计分析。

图 8 为利用夫琅和费暗线方法计算的冬小麦冠层在 760nm, 688nm 波段的相对荧光强度与 F_v/F_m 的统计散点图, 图 9 为地锦冠层在 760nm, 688nm 波段的相对荧光强度与 F_v/F_m 的统计散点图。结果表明: 利用夫琅和费暗线方法探测植被冠层荧光相对强度与荧光动力学参数 F_v/F_m 存在极显著的负相关关系, 其中冬小麦冠层在 688nm 和 760nm 的荧光相对强度与 F_v/F_m 复相关系数分别达到 0.81 和 0.913。地锦冠层在 688nm 和 760nm 的荧光相对强度与 F_v/F_m 复相关系数分别达到 0.784 和 0.794。图 8 和图 9 中探测的荧光相对强度为 0.01—0.03 左右, 考虑到荧光光谱特性, 这与公认的荧光释放能量通常不到 1% 的光合有效辐射能量结论是一致的。

因此, 利用夫琅和费暗线方法能够快速、直观、

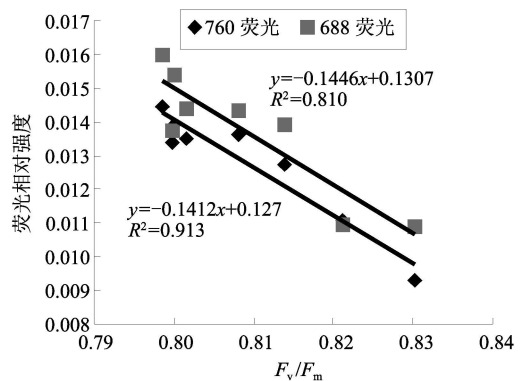


图 8 760nm, 688nm 波段的冬小麦荧光与 F_v/F_m 统计关系
Fig 8 Relating F_v/F_m to solar induced fluorescence of winter wheat at 760nm and 688nm (n=8)

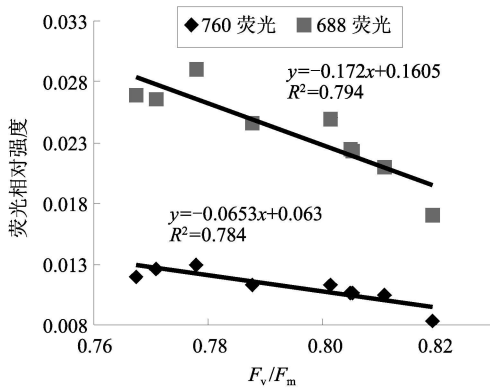


图 9 760nm, 688nm 波段的地锦荧光与 F_v/F_m 统计关系

Fig. 9 Relating F_v/F_m to solar induced fluorescence of *Parthenocissus tricuspidata* at 760nm and 688nm ($n=9$)

可靠地探测植被冠层荧光, 并有可能替代传统的激光脉冲调制荧光仪测定方法, 并推广到航空平台, 实现荧光探测从接触式点测量到航空或卫星遥感大面积监测的飞越。

4 结果与讨论

目前叶绿素荧光探测主要采用荧光光谱法, 它利用调制叶绿素荧光仪、荧光分光光度计等荧光测量仪器, 测量单色光激发照明条件下的荧光波长的发射荧光, 这种方法测定的叶绿素激发荧光与自然条件光合作用的荧光的物理意义差别很大, 并且, 由于使用条件的限制(激光激发、叶片接触式测量等), 难以推广到遥感应应用。自然光照条件下测定的植被反射的辐照度光谱既包括太阳光诱导荧光的发射光谱, 又包括叶片对入射光的反射光谱。由于荧光发射光谱和植被冠层反射光谱是混合在一起的, 所以研究如何从冠层光谱中提取荧光光谱有十分重要的应用价值。

论文研究将太阳大气吸收形成的夫琅和费暗线的原理扩展到地球大气, 利用地球大气中的 688nm, 760nm 两个氧气吸收谱, 结合夫琅和费暗线方法, 探测自然光照条件下的植被荧光光谱, 取得的进展包括:

(1) 利用地物光谱仪测定的冠层辐照度光谱中 688nm 和 760nm 两个氧气吸收形成的夫琅和费暗线特征明显, 且荧光较强, 所以利用这两个波段的夫琅和费暗线, 可以计算太阳光诱导的光合作用荧光。论文提出的利用野外地物光谱仪的辐照度模式观测的数据探测植被荧光, 拓展了野外地物光谱仪的使

用功能。

(2) 晴朗天气条件下的太阳光诱导的荧光随时间的日变化呈单峰特性, 且荧光对 PAR 十分敏感, 复相关系数达到了 0.9 以上。

(3) 冬小麦(单子叶植被)和地锦(双子叶植被)的冠层荧光光谱特性有较大的差异, 其中冬小麦冠层荧光光谱在 760nm 和 688nm 波段的荧光大小基本相等, 而地锦冠层荧光光谱在 688nm 波段的荧光大小是 760nm 波段的 3 倍左右。表明荧光光谱能够更加敏感地反映植被物种或生理生化状况的差别。

(4) 利用夫琅和费暗线方法计算地植被冠层荧光能够更加直观地反映自然条件下的光合作用的荧光信息, 且它与荧光动力学参数 F_v/F_m 存在极显著的负相关关系, 所以利用夫琅和费暗线方法能够探测植被冠层荧光, 并有可能替代传统的激光脉冲调制荧光仪测定方法, 并推广到航空或卫星平台, 实现荧光探测从接触式的点测量方式到航空或卫星遥感大面积监测的技术飞越。

(5) 本文研究光谱仪探头离冠层 1.3m 高度, 没有考虑冠层荧光到传感器之间的氧气吸收。对于航空或卫星平台的荧光遥感监测, 需要考虑氧气吸收对冠层荧光的上行辐射传输的影响。

参 考 文 献 (References)

- [1] Bolhar Nordenkampl H R, Long S R, Baker N R, et al. Chlorophyll Fluorescence as a Probe of the Photosynthetic Competence of Leaves in the Field: a Review of Current Instrumentation[J]. *Functional Ecology* 1989 3(4): 497-514.
- [2] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll Fluorescence as a Non-Destructive Indicator for Rapid Assessment of in vivo Photosynthesis[J]. *Ecological Studies* 1994 100(1): 49-70.
- [3] Genty B, Briantais JM, 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.
- [4] McFarlane J G, Watson R D, Theisen A E, et al. Plant Stress Detection by Remote Measurement of Fluorescence[J]. *Applied Optics* 1980 19(19): 3287-3289.
- [5] Krause G H, Weis E. Chlorophyll Fluorescence as a Tool in Plant Physiology: II Interpretation of Fluorescence Signals[J]. *Photosynthesis Research* 1984 5(2): 139-157.
- [6] Lin S Q, Xu C H, Zhang Q D, et al. Some Application of Chlorophyll Fluorescence Kinetics to Plant Stress Physiology Technology and Agricultural Remote Sensing[J]. *Chinese Bulletin*

- of Botany*, 1992, 9(1): 1—16. [林世青, 许春辉, 张其德等. 叶绿素荧光动力学在植物抗性生理学、生态学和农学现代化中的应用[J]. 植物学通报, 1992, 9(1): 1—16.]
- [7] Gamon J A, Serrano L, Surfus J S. The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency Across Species, Functional Types, and Nutrient Levels[J]. *Oecologia*, 1997, 112(4): 492—501.
- [8] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, *et al*. Chlorophyll Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance: II. Leaf Level Measurements and Model Simulation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(3): 582—608.
- [9] Carter G A, Jones JH, Mitchell R J, *et al*. Detection of Solar Excited Chlorophyll A Fluorescence and Leaf Photosynthetic Capacity Using a Fraunhofer Line Radiometer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(1): 89—92.
- [10] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, *et al*. Estimation of Chlorophyll Fluorescence Under Natural Illumination From Hyperspectral Data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2001, 3(4): 321—327.
- [11] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Mohammed G H, *et al*. Vegetation Stress Detection Through Chlorophyll A+B Estimation and Fluorescence Effects on Hyperspectral Imagery[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(5): 1433—1441.
- [12] Echli C. Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing[M]. John Wiley, New York, 1987.
- [13] Plascyk J A, Gabriel F C. The Fraunhofer Line Discriminator MK II—An Airborne Instrument for Precise and Standardized Ecological Luminescence Measurements[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1975, 24(2): 306—313.