

文章编号: 1007-5461(2002)05-0404-06

光合作用 PSII Chl 分子传能超快光谱学

王水才¹, 贺俊芳^{1,2}, 蔡霞^{1,2}, 任兆玉^{1,2}, 侯洵¹, 李良璧³, 匡廷云³

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068);

(2 西北大学, 西安 710069);

(3 中国科学院植物研究所光合作用研究中心, 北京 100093)

摘 要 利用 ICCD 皮秒、飞秒扫描成像和飞秒时间分辨光谱装置实验研究了高等植物捕光天线 LHC II 三聚体和 PS II 颗粒复合物及 PSII 核心复合物的超快光谱动力学, 经过吸收光谱和发射光谱分析, 确定在 LHC II 三聚体中至少存在 7 种 Chl 分子光谱特性, 它们是: Chl b_{653/656}^{658.7}、Chl a_{662.0}^{665.2}、Chl a/b_{670/671}^{671.6}、Chl a_{675.0}^{677.1}、Chl a_{680/681}^{682.9}、Chl a₆₈₅^{689.1} 和 Chl a_{695.0}^{695.6}。采用光强 10^{13} 光子/cm²/脉冲激励浓度为 30 μg/ml 的捕光天线 LHC II 三聚体, 在 650 nm 到 705 nm 谱段逐点探测分析处理, 产生了两组短寿命组分 210 fs、520 fs 和 5.2 ps、36.7 ps 及两个长寿命组分 1.8 ns、2 ns。最快的三个寿命 210 fs、520 fs 和 5.2 ps 反映了三聚体 Chl b 分子向 Chl a 分子的激发能传递过程; 寿命 36.7 ps 反映了 Chl a 分子向相邻单体 Chl a 分子的激发能传递过程; 最长的两个寿命 1.8 ns 和 2 ns 是在三聚体中 Chl a 分子通过中间体 Chl a 分子辐射荧光, 分别跃迁回基态的过程。获得的六个寿命组分有把激发能传递时间与 Chl a/b 分子发射光谱相结合的特点。经拟合处理解析 PS II 颗粒复合物光谱, 得到三个组分谱, 其峰值分别为 686.8 nm、692.2 nm 和 694.9 nm, 与 LHC II 比较分析, 说明天然构型的 PS II 有很强吸收光能和有效传递光能的本领。PSII 核心复合物的核心天线 CP43 和 CP47, 各自含有三种不同状态的 Chl a 分子, CP43 有 Chl a₆₆₀⁶⁶¹、Chl a₆₆₉⁶⁷⁰、Chl a₆₈₂⁶⁸⁶, CP47 有 Chl a₆₆₀⁶⁶¹、Chl a₆₆₉⁶⁷⁰、Chl a₆₈₀⁶⁸¹。

关键词 光系统 II; 叶绿素分子; 能量传递; 超快光谱

中图分类号: TN249

文献标识码: A

1 引言

光系统 II (PSII) 颗粒复合物包含捕光天线 LHClI 和核心天线 CP43、CP47 及反应中心 D1-D2-Cytb559 复合物, 在高等植物光合作用 PSII 中, 激发能传递途径是: 由捕光天线 LHClI 中的聚光色素分子高效吸收太阳能, 通过辅助外周天线 CP29、CP26 和 CP24 把光能传递给核心天线 CP43 和 CP47, 然后再由 CP43 和 CP47 分别把激发能传递到反应中心 D1-D2-Cytb559, 进行稳定的光化学反应。从 PSII 颗粒复合物中提纯出 LHClI 后, 剩余的为 PSII 核心复合物。PSII 核心复合物含有 CP43、CP47 及 D1 - D2 - Cytb559。

Trinkunas 等人^[1] 对于高等植物的捕光复合物 II(LHClI) 三聚体的吸收光谱分析, 在大约 635~700 nm 光谱范围有 12 条叶绿素吸收谱带。在捕光天线 LHClI 中, 叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b) 和 β -胡萝卜素 (β -Car) 分子天然排列非常紧密, 这些色素从接收光能到形成激发态仅需要 1 fs(10^{-15} s) 多时间, 根本来不及发射荧光和无辐射跃迁。分子吸收谱多, 表明 LHClI 能在宽频谱范围吸收光能, 加之天线色素分子之间排列紧密, 一般分子间距小于临界距离 7 nm, 光量子在这些分子之间主要以 Förster 共振传能机制进行激发能传递, 有高效吸能和有效传能的特点。我们曾经利用四能级理论研究了 LHClI 中光合色素分子之间激发能传递规律^[2], 色素分子之间能量传递的主要方式是在能级相邻分子之间进行, 能级非相邻色素分子之间的能

基金项目: 国家重点基础研究专项基金资助项目 (编号: G1998010100)。

收稿日期: 2001-10-15; 修改日期: 2001-12-05

量传递过程也存在,但是在总能量中所占比例很小。由菠菜提纯的捕光复合物 II 含有主外周天线 LHCIIb,以三聚体形式存在。CP29、CP26 和 CP24 以单体形式存在。它们分别包含了大约 5% 的 PSII 色素分子。近年来研究绿色植物的 LHCII 超快光谱及能量传递特性趋向于采用很低强度光源^[3],以便得到比较接近实际情况的结果,直接观测 LHCII 的超快能量传递过程^[4]研究方法是值得采用的手段。由 Barber 等人^[5]的电子结晶学、单粒子分析得知, LHCII 构筑于 CP43 和 CP47 的外侧, CP43 靠近 D1 蛋白, CP47 靠近 D2 蛋白, CP47 比 CP43 更靠近反应中心。CP43 和 CP47 位于异二聚体 D1、D2 多肽反应中心的两侧,并且通过 Chl a 分子与 D1、D2 两个多肽紧密相连。LHCII 键接了 PSII 颗粒约 65% 的 Chl 分子,在植物生长过程中,先形成单体,后形成三聚体,每个单体含 7 个 Chl a 分子, 5 个 Chl b 分子, 2 个 β -Car 分子和 2 个叶黄素分子。CP43 和 CP47 都只含 Chl a 分子和 β -Car 分子,各自分别键接了 20~25 个 Chl a 分子和 4~5 个 β -Car 分子。反应中心有细胞色素 b559 和 D1、D2 多肽, D1 和 D2 分别是由 psbA 和 psbD 基因编码的 38.0 Kda 和 39.4 Kda 多肽色素蛋白复合物。在捕光天线 LHCII 吸收光能后, Chl 分子和 β -Car 分子被激发,在 Chl 分子之间传递能量,而 β -Car 分子最终把能量传递给 Chl 分子,最后由核心天线中 Chl a 分子把能量传递到反应中心。传递能量的主要承担者是 Chl 分子。激发能传递在很大程度上决定于 PSII 构型、色素分子结构、分子间距、空间取向等。本文报道 PSII Chl 分子传能超快光谱学和最新的捕光天线 LHCII 三聚体吸能、传到反应中心的超快动力学光谱和激发能传递过程相结合实验结果。

2 材料和方法

采用中国科学院植物研究所光合作用研究中心提纯的捕光复合物 LHCII 和 PSII 颗粒复合物及 PSII 核心复合物样品,实验时,样品浓度为 30~100 $\mu\text{g}/\text{ml}$,提纯方法参照 Satoh 和 Nanba(1987 年)的方法。样品通常保存在液氮中,样品盒采用 3π 荧光收集装置,能够有效地收集 3π 立体角内发射的荧光。

采用 ICCD 皮秒、飞秒扫描成像光谱仪^[6]和飞秒时间分辨泵浦探测光谱仪^[7]进行光谱实时测量激发能传递光谱动力学研究,光源采用 Tsunami 钛宝石飞秒激光器,输出 100 fs 宽光脉冲,调谐在 720~850 nm,倍频输出 360~425 nm,基波功率约为 300 mW。另外还采用氩激光器 514 nm 光锁模,得到 100 ps 宽约 500 mW 的光脉冲。采用信息处理 Boxcar 系统收集 RC31034A 光电倍增管输出的信号,进行处理,单色仪是 SPEX270M,用于光谱成像扫描。通常样品激励后,有两道探测系统,一路用于光谱成像扫描,另外一路用于单光子计数测量。在进行 LHCII 激发能传递光谱测量时,其浓度 30 $\mu\text{g}/\text{ml}$,处于 273 K。采用功率 2~3 mW 的波长 400~425 nm 偏振光激励,另外还采用氩离子激光器锁模产生 100 ps 宽的 514 nm 波长的激励光。利用 ICCD 皮秒扫描成像光谱仪获得的 LHCII 荧光发射积分谱见图 1;采用飞秒时间分辨泵浦探测光谱仪,在 650~705 nm 范围内逐点探测 LHCII 激发能传递荧光光谱特性,并进行荧光衰减数据处理,见图 2;PS II 颗粒复合物的荧光发射光谱见图 3;PSII 核心复合物的荧光光谱见图 4。

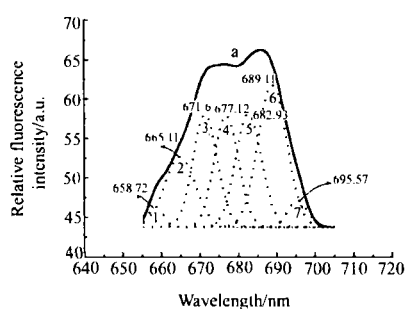


Fig.1 The fluorescence spectrum of LHC II

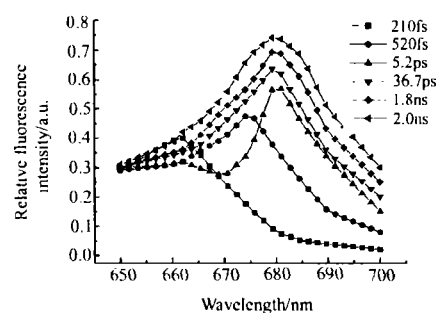


Fig.2 The fluorescence spectrum dynamics of excitation energy transfer in LHC II

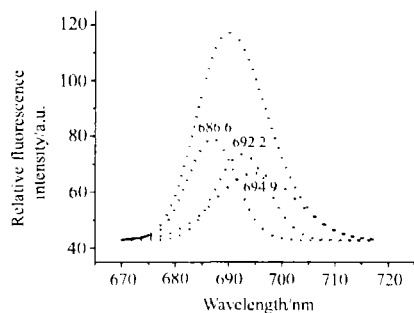


Fig.3 The fluorescence integral spectrum and component spectrum of PS II particle complex

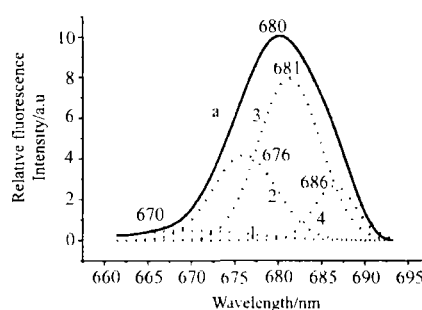


Fig.4 The fluorescence spectrum of PS II core complex

3 PS II 中 Chl 分子有效吸能、传能超快光谱学

高等植物光合作用 PS II 有效吸能全靠捕光复合体 LHClI 来实现,从图 1 的 LHClI 荧光光谱和解析出的组分光谱看到,实时测量得到的积分光谱在 650~705 nm 范围,中心波长在 680 nm。在 670 nm 和 687 nm 附近有两个不太尖锐的峰值。在该积分光谱的范围内,解析出 7 个高斯光谱组分,它们的参数见表 1。

表 1 LHClI 7 个组分光谱参数由于荧光光谱和吸收光谱有镜像对称性

序号	峰值波长 (nm)	组分谱 FWHM((nm)	光谱强度	谱面积积分
1	658.72	3.9660	2.6038	12.943
2	665.21	7.9064	8.9788	88.972
3	671.60	6.3022	14.385	113.62
4	677.12	6.2610	14.222	111.60
5	682.93	6.7047	14.433	121.28
6	689.11	7.4493	18.129	169.26
7	695.57	4.9986	3.4604	21.679

由于荧光光谱和吸收光谱有镜像对称性, Chl a、Chl b 和 β -Car 色素分子都承担吸收光能的任务,在测得 650~705 nm 范围的光谱段内,经过吸收光谱和发射光谱分析, Chl 分子出现 7 种光谱特征,它们是: Chl b_{653/656}^{658.7}、Chl a_{662.0}^{665.2}、Chl a/b_{670/671}^{671.6}、Chl a_{675.0}^{677.1}、Chl a_{680/681}^{682.9}、Chl a_{685.0}^{689.1}、和 Chl a_{695.0}^{695.6} (Chl a_a^c, a 代表吸收峰, c 代表发射峰)。当我们采用 400~425 nm 波长、 10^{13} 光子/cm²/脉冲光强、100 fs 持续期的光脉冲激励浓度为 30 μ g/ml 的 LHClI 三聚体样品时,在 560~740 nm 之间进行逐点探测飞秒激光诱导出的荧光光谱和荧光衰减曲线,并且结合组分光谱强度拟合出组分寿命。从图 2 看到,逐点探测拟合处理产生的两组超快寿命组分为: 210 fs、520 fs 和 5.2 ps、36.7 ps,以及两组长寿命组分为 1.8 ns、2.0 ns,这六个寿命组分反映了捕光天线 LHClI 三聚体中叶绿素分子的激发能传递过程。寿命 210 fs 反映了 LHClI 三聚体中 Chl b_{653/656}^{658.7} 分子向 Chl a_{662.0}^{665.2} 分子间能量传递过程;寿命 520 fs 反映了相邻 Chl b_{653/656}^{658.7} 分子向 Chl a_{675.0}^{677.1} 分子间能量传递过程;寿命 5.2 ps 反映了 Chl b_{653/656}^{658.7} 分子经过中间体 Chl a 分子将能量传递到 Chl a_{680/681}^{682.9} 分子的过程;寿命 36.7 ps 反映了 Chl a_{675.0}^{677.1} 分子吸收光能之后,由于偶极子间相互作用产生光谱红移,随后将能量传递到 Chl a_{680/681}^{682.9} 分子的过程;长寿命 1.8 ns 反映了 LHClI 中无能量捕获中心,由 Chl a_{675.0}^{677.1} 分子通过中间体 Chl a 分子把能量传递到 Chl a_{689.1}^{689.1} 分子,最后辐射荧光跃迁回基态的过程;寿命 2.0 ns 反映了 Chl a_{680/681}^{682.9} 分子间在辐射能量波长变换中,由于 Chl a 分子间相互作用,产生光谱红移,将能量传递到 Chl a_{695.0}^{695.6} 分子,最后通过辐射更长波长的荧光返回到基态的过程。只有单独的 LHClI 复合物天线时,接收光能的吸收谱线和发射谱线多了,由于没有光捕获中心,消耗能量返回基态。

我们得到的三聚态 LHClI 能量传递组分寿命与 Holzwarth 等人测定分析提出的 Chl a/b 传能过程基本

一致^[8], 差异是不同测试条件引起的, 本结果有把激发能传递时间与 Chl a/b 分子荧光光谱结构相互结合的特点。图 3 的 PS II 颗粒复合物积分光谱是利用 ICCD 飞秒扫描成像光谱仪实时测量得到的, 其组分光谱是高斯解析谱。由于天线色素分子吸收光能过程就是其激发过程, 激发光谱的形状和吸收光谱的形状极为相似, 通常吸收光谱有偶极子作用不同的红移会出现。这样 LHCII 三聚体在 650~705 nm 谱段, 还有极强的吸收太阳光能的能力。在实验中 PS II 颗粒复合物在 670 nm 到 715 nm 谱段, 有 3 条发射光谱, 能最大限度地吸收光能, 而在 640~675 nm 谱段, 没有出现发射荧光峰, 说明在这个谱段, 捕光天线色素分子能够以最高的效率传递光能, 仅有微弱的荧光辐射损耗。PSII 颗粒复合物 3 条发射光谱峰值为 686.6 nm、692.2 nm、694.9 nm, 这 3 条发射带正好对应 LHCII 三聚体的 682.9 nm、689.1 nm、695.6 nm 三个发射谱。图 4 表示出 PSII 核心复合物的积分荧光光谱, 谱的峰值在 680 nm 处, 微分谱的峰值 661 nm、670 nm、676 nm、681 nm 和 686 nm 是测量得到的, 在 661 nm 到 693 nm 范围的 4 个组分谱是用峰值 670 nm、676 nm、681 nm 和 686 nm 解析得到的。分析这些组分荧光光谱及 Chl a 的吸收谱, 得到 PSII 中核心天线 CP43 和 CP47 分别结合三种不同状态的 Chl a 分子, CP43 中有 Chl a₆₆₀⁶⁶¹、Chl a₆₆₉⁶⁷⁰、Chl a₆₈₂⁶⁸⁶, CP47 有 Chl a₆₆₀⁶⁶¹、Chl a₆₆₉⁶⁷⁰、Chl a₆₈₀⁶⁸¹。由于 LHCII 本身没有能量捕获中心, Chl 分子基态和激发态都有振动能级, 激发态的电子比相邻分子有较大的振动能级, Chl 分子吸收光能之后, 总有部分 Chl 分子跃迁到受激虚态, 随后跃回到基态中的某一较高振动能级激发态上, 释放出较小能量的光子, 产生 Stokes 位移, 最后以更高强度的荧光发射损失能量。PSII 颗粒复合物, 有天然捕光天线 LHCII 和能量捕获中心, 即反应中心, 有 P680 最有效的能量捕获中心, 看到在 680 nm 附近, 荧光损失很小, 大于 680 nm 的光谱范围, 荧光损失很大。所以有 P680 能量捕获中心, 加之在光照 400 nm 波长转换到 P680 附近时, 经过有极强吸收光能本领的 Chl b650 和 Chl a670 两种叶绿素分子, 每个 LHCII 三聚体最少有 12 条吸收光谱通道, 从阳光中摄取能量, 通过集光色素分子天然紧密空间结构, 汇聚光能并且传递到反应中心, 激发少数叶绿素分子, 激发电子的光能就是由这些叶绿素分子流入 P680。我们已经报道^[2] PSII 核心复合物有 4 种寿命组分, 分别为 3.5 ps、12 ps、25 ps 和 160 ps。对核心天线 CP43 和 CP47 激发能传递动力学研究, 得到了长寿命 3.54 ns 和 3.22 ns 的能量传递组分^[9], 说明只要有能量捕获中心的 PS II 复合物很难得到长寿命组分, 仅有 PS II 颗粒复合物的 LHCII 天线接收到光能后, 在约 200 ps 之内就将激发能传递到反应中心进行稳定的光化学反应。Trinkunas 等人研究分析 LHCII 三聚体在 640~700 nm 谱带有 12 条 Chl 分子吸收谱, 我们测得 LHCII 三聚体在 650~705 nm 谱带有 7 条 Chl 分子荧光发射谱, 这就足够表明捕光天线有极强的吸收光能的本领。从图 2 和图 3 中的 PSII 颗粒复合物荧光发射谱看到, 只要 PSII 有完整的天然构型, 在 680 nm 以前的光谱段, 荧光辐射损耗极小, 说明捕光天线高效吸收光能之后, 能以极高的转换效率把能量在几十 ps 之内传递到核心天线, 然后核心天线经过大约 100 多 ps 之后, 分别把光能传递到反应中心^[2], 这说明在 PSII 中激发能传递速度是非常快的。Chl b 分子向 Chl a 分子传能效率接近 100%^[10], 激发能传递到反应中心, 几乎以 100% 的量子效率转化为光化学反应的内能。这些数据都充分说明 PSII 的捕光天线 LHCII 天然结构有很强的吸收太阳能的本领, 并且能高效而迅速地将激发能传递到光合作用反应中心。

4 结果与讨论

通过对捕光天线 LHCII 和 PSII 颗粒复合物荧光光谱、激发能传递动力学探测, 对于 LHCII 积分光谱解析得出 7 条高斯组分谱, 并且与吸收谱和荧光发射谱比较, 在 650~705 nm 光谱段得到 LHCII 三聚体出现 Chl b_{653/656}^{658.7}、Chl a_{662.0}^{665.2}、Chl a/b_{670/671}^{671.6}、Chl a_{675.0}^{677.1}、Chl a_{680/681}^{682.9}、Chl a_{685.0}^{689.1} 和 Chl a_{695.0}^{695.6} 等 7 种光谱特性。PSII 核心天线 CP43 和 CP47 各自结合三种不同状态的 Chl a 分子, CP43 中有 Chl a₆₆₀⁶⁶¹、Chl a₆₆₉⁶⁷⁰、Chl a₆₈₂⁶⁸⁶, CP47 有 Chl a₆₆₀⁶⁶¹、Chl a₆₆₉⁶⁷⁰、Chl a₆₈₀⁶⁸¹。PSII 颗粒复合物有利于激发能传递的最少荧光谱线。通过逐点探测荧光衰减谱, 结合组分光谱进行数据处理, 得到在 LHCII 三聚体中激发能传递的 6 个寿命组分, 其中有 2 组最快寿命组分 210 fs、520 fs 和 5.2 ps、36.7 ps, 两个长寿命组分为 1.8 ns 和 2.0 ns。

三个最快的寿命组分 210 fs、520 fs 和 5.2 ps 反映了捕光天线色素 Chl b 分子接收到的光能通过不同状态的 Chl a 分子分别传递到 Chl a662、Chl a675、Chl a680 的超快过程; 寿命 36.7 ps 反映了 Chl a675 分子吸收光能之后, 由于偶极子的相互作用产生光谱红移, 随后将能量传递到 Chl a680 分子的过程; 长寿命 1.8 ns 和 2.0 ns 反映了 Chl a 分子接收到光能, 通过相邻的单体 Chl a 分子依次进行波长变换, 最后辐射荧光跃迁回到基态的能量传递过程。我们在 LHCII 三聚体中得到了从 650~705 nm 范围内 7 条荧光发射谱和光能从 LHCI 到达反应中心传递时间约为 200 ps 的尺度, 因此看出光系统 II 天然结构有极强的吸收光能的本领和超快传递激发能的速度, 光能传递到反应中心几乎有 100% 的量子效率转化成稳定的进行光化学反应的电。Connelly 等人采用光强 $(1.6 - 9) \times 10^{12}$ 光子 $\text{cm}^2/\text{脉冲}$, 在 650 nm 波长激励下, 进行飞秒分辨瞬态吸收测量 LHCII 三聚体光能传递时间, 在 645 nm 到 690 nm 之间得到短寿命组分 175 fs、625 fs 和 5 ps, 长寿命组分 ≥ 790 ps、3.6 ns。从实验得知, 荧光寿命在很大程度上依赖于激发光强度、样品浓度和实验温度。LHCII 的组分吸收谱和荧光发射谱重叠相当严重, 而且吸收谱和发射谱数量相当多, 从 440~700 nm 谱带吸收峰远远多于 12 条, 我们仅仅报道了自己在 650~705 nm 谱段的实验和分析结果。我们正在对 PSII 样品用双波长或三波长飞秒激光^[11,12]进行飞秒时间分辨多激发态光谱学研究, 将会得到全新的结果。在 650~715 nm 谱段范围内所有 10 条组分光谱峰值波长偏差在 ± 0.3 nm 之内, 所以实验给出的高斯解析谱精度是很高的, 即理论与实际符合得很好。只有 LHCII 天然构型, 吸收、发射谱有 7 条之多, 说明捕光天线有极强的收集光能力; 只有 PSII 核心复合物, 得到 4 条荧光谱, 而且都是叶绿素 a 辐射出的荧光, 其峰值分别为 670 nm、676 nm、681 nm 和 686 nm。核心天线 CP43 和 CP47 分别有 3 条光谱组分, 分别通过自己的通道向反应中心传递能量, 彼此很难进行能量交换。只有 PSII 颗粒天然构型, 仅仅得到 3 条荧光发射谱, 而且谱带分布在 675~710 nm 范围内, 说明有完整的 PSII 天然构型, 不仅有极强的吸收光能的能力, 还有高效的传递激发能的能力, 在光能传递到达光化学活性叶绿素 P680 之前, 辐射荧光损耗是极其微弱的。可以理论计算出集光色素分子吸收蓝光、红光, 将能量传递到达光合作用反应中心 P680 的光能传递效率最佳值好于 82%, 计算所采用的损耗能量包括波长变换无辐射损耗、荧光、磷光等机制引起的总损耗^[2], 计算认可了 PSII 有理想的天然构型, 有利于最有效的能量传递核几何构型、自旋位形、分子空间取向等。太阳发射的有利于高等植物光合作用的谱段在 380 nm 到 760 nm 范围, 而集光色素分子叶绿素 a、叶绿素 b、 β -胡萝卜素的吸收谱正好在 400~680 nm 处, 自然界的这种安排保持了地球上万物生长、生命繁衍, 人类社会的发展。

参 考 文 献

- 1 Trinkunas G, Connelly J P, Müller M G *et al.* Model for the excitation dynamics in the light-harvesting complex II from high plants [J]. *J. Phys. Chem. B*, 1997, 101: 7313~7320
- 2 王水才, 贺俊芳, 张 舒等. PSII 高效传能超快微观机理研究 [J]. 光子学报, 2000, 30(1): 120~133
- 3 Connelly J P, Müller M G, Huckle M *et al.* Ultrafast spectroscopy of trimeric light-harvesting complex II from high plants [J]. *J. Phys. Chem. B*, 1997, 101: 1902~1909
- 4 Du Mei, Xie Xiaoliang, Laurens Mets *et al.* Direct observation of ultrafast energy-transfer processes in light-harvesting complex II [J]. *J. Phys. Chem.*, 1994, 98: 4736~4741
- 5 Barber J. Photosystem two [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1998, 1365: 269~277
- 6 张 舒, 贺俊芳, 贺锋涛等. 光系统 II 荧光特性快速扫描成像光谱技术研究 [J]. 光子学报, 2001, 30(1): 6~10
- 7 贺俊芳, 王水才, 杨鸿儒. 飞秒差异吸收微弱信号测量技术 [J]. 光子学报, 1999, 28(10): 888~891
- 8 Holzwarth A R. in Mathis P(ed), *Photosynthesis: From light to Biosphere* [C] // Kluwer Acad Pub Dordrecht, 1995, 1: 523

- 9 贺俊芳, 王水才, 张 舒等. 内周天线 CP43、CP47 中 β -Car 到 Chl a 分子间的能量传递 [J]. 光子学报, 2001, 30(4): 385~390
- 10 Horton P, Ruban A V, Walters R G. Regulation of light-harvesting in green plants [J]. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Biol.*, 1996, 47: 655~684
- 11 王水才, 贺俊芳. 飞秒激光探测 PSII 高效传能途径和技术研究 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2001, 18(2): 3~9
- 12 Shuicai W, Junfang H, Dong X *et al.* A three-wavelength Ti: sapphire femtosecond laser for use with the multi-excited photosystem II [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, 72: 819~821

Ultrafast Spectroscopy of Chlorophyll Molecule Energy Transfer of Photosystem II in Photosynthesis

Wang Shuicai¹, He Junfang^{1,2}, Cai Xia^{1,2}, Ren Zhaoyu^{1,2},
Hou Xun¹, Li Liangbi³, Kuang Tingyun³

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068 China);

(2 Northwest University, Xi'an 710069 China);

(3 Photosynthesis Research Center, Institute of Botany, Chinese Academy of sciences, Beijing 100093 China)

Abstract Ultrafast spectroscopy in the light-harvesting complex II, photosystem II particle complex and photosystem II core complex has been studied using ICCD femtosecond image scanning set and femtosecond time resolved spectrometer. 7 spectral components of chlorophyll a/b molecule have been obtained from the trimeric light-harvesting complex II, and they are Chl b_{653/656}^{658.7}、Chl a_{662.0}^{665.2}、Chl a/b_{670/671}^{671.6}、Chl a_{675.0}^{677.1}、Chl a_{680/681}^{682.9}、Chl a_{685.0}^{689.1} and Chl a_{695.0}^{695.6}(Chl a_e^e, a is the absorption spectrum peak, e is the emission spectrum peak). Exciting in the trimeric light-harvesting complex at 440 nm with intensity of 10¹³ photos/cm²/pulse, fluorescence kinetics from 605 nm to 705 nm, yields 4 ultrafast component lifetimes of 210 fs and 520 fs, 5.2 ps and 36.7 ps, and 2 long component lifetimes of 1.8 ns and 2 ns. The three fastest lifetimes of 210 fs, 520 fs and 5.2 ps directly reflect from trimeric Chl b to Chl a energy transfer processes. The lifetime 36.7 ps shows the energy transfer time from Chl a to nearby monomer Chl a. The longest 2 lifetimes reflect the energy transfer processes of Chl a molecules from excited state to ground state through middle Chl a molecules in the trimeric. CP43 and CP47 of PSII core antenna has three Chl a molecules of different condition, they are CP43-Chl a₆₆₀⁶⁶¹, CP43-Chl a₆₆₉⁶⁷⁰, CP43-Chl a₆₈₂⁶⁸⁶, CP47-Chl a₆₆₀⁶⁶¹, CP47-Chl a₆₆₉⁶⁷⁰, CP47-Chl a₆₈₀⁶⁸¹.

Key words photosystem II; chlorophyll molecule; energy transfer; ultrafast spectroscopy

王水才 中国科学院西安光机所研究员, 博士生导师. 研究领域: 飞秒激光技术、生命光学、超短激光与物质相互作用超快过程研究.