科 学 通 报
第 42 卷 第 1 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 1 月

【专题评述】

藻类天线系统的结构与功能研究进展

蒋丽金 赵井泉
(中国科学院感光化学研究所,北京 100101)

关键词 藻类天线系统 结构 藻胆蛋白

藻类在植物进化序列中处于低等的光合细菌和高等植物之间. 藻类和高等植物光合器相似,它们都有光系统Ⅱ和光系统Ⅰ两个光合反应中心,因而它们具有相似的光合作用功能,因此藻类光合作用的研究具有一般的意义;另一方面,高等植物的捕光天线是类囊体膜内的叶绿素,而藻类的捕光天线色素主要集中于紧连在类囊体膜外的藻胆体内.

藻胆体是由多种藻胆蛋白组成的超分子复合物,含有数百个开链四吡咯色团,分子量高达几百万道尔顿. 藻胆体的核心部分是变藻蓝蛋白,由核心向外放射状排列六根由藻红和藻蓝蛋白构成的天线杆,藻胆体的结构如图 1 所示. 各种藻胆蛋白的巧妙搭配使得藻胆体内具有非常高能量传递效率(90% 以上[1~3]). 因而,研究藻类天线系统的结构与功能,弄清其中高效能量传递的分子机理,对人工利用太阳能和光能转换器件的开发有借鉴和指导意义,多年来,藻类天线系统的结构与功能研究一直是重要的研究课题之一.

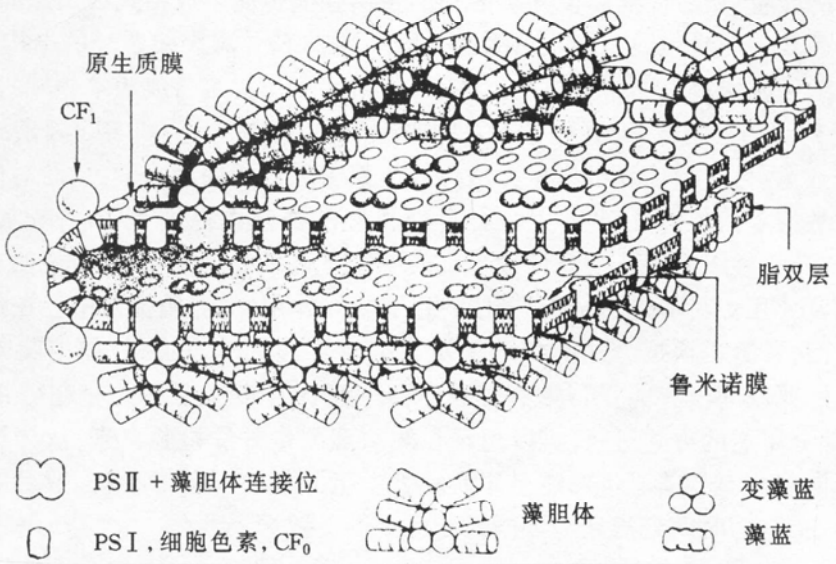


图 1 蓝藻藻胆体及与类囊体连接的模型图[4]

1 结构研究进展

多年来,对藻类天线系统以及其中的藻胆蛋白的结构与组成有大量的研究工作,如蓝藻和一些红藻中各种藻胆蛋白的亚基组成、亚基中胆素色团的类型和数目以及他们的光谱性质[5],海洋高等红藻中藻胆蛋白的亚基组成以及初步晶体学研究工作[6~13]. 这些工作使得对从低等蓝藻到高等海洋红藻的基本结构和组成有了比较清楚的认识.

近年来藻类天线系统研究中最重要进展表现在高分辨晶体结构研究,80年代中期,

Deisenhofer, Huber[14]以X射线晶体结构分析方法确定了光合细菌反应中心的三维结构，并荣获1988年诺贝尔化学奖. 此后，X射线晶体结构分析方法已经成为从原子和分子水平研究藻胆蛋白结构的一种有力手段. 其中蓝藻中C-藻蓝蛋白三聚体和六聚体[15]、三聚体的藻红蓝蛋白[16]、三聚体的b-藻红蛋白[17]和六聚体的B-藻红蛋白[18]、三聚体的变藻蓝蛋白[19]等高分辨的晶体结构(0.166～0.270 nm)已经得到；中国科学院生物物理研究所与我们合作的海洋高等红藻-多管藻中六聚体的R-藻红蛋白，于1995年底获得0.28 nm分辨率的晶体结构. 高分辨晶体结构极大地促进了藻胆蛋白功能的研究. 首先，由于晶体结构从原子水平上给出了各个色团的空间位置和排列方向以及它们之间相互作用的强度，这对超快速时间分辨光谱的组分解析与指认有直接的指导作用；另一方面，利用晶体结构数据和蛋白中各个色团吸收和荧光光谱数据[20]，以Forster偶极共振能量转移机理[21]计算各对色团之间能量传递速率常数，进而可以微分方程法[22,23]和计算机随机模拟法[24～27]计算整个蛋白体系中各途径能量传递动力学参数，从而把体系中能量传递动力学过程清楚地显示出来. 如图2所示.

X射线晶体结构分析方法无疑为最终弄清天线系统结构与功能提供了希望. 然而，值得提到的是，目前已经得到的天线系统的晶体结构数据还只限于孤立态的三聚体或六聚体的藻胆蛋白，而天线系统是多种藻胆蛋白有机结合的整体，在藻胆蛋白的三聚体与三聚体之间，六聚体的盘与盘之间，天线的杆与核之间以及整个天线与光合反应中心之间都有不同分子量的连接蛋白存在，这些连接蛋白除了起连接和固定藻胆蛋白的作用外，它们还调制藻胆蛋白最低激发单线态的能量，从而使得即使同类的藻胆蛋白之间也能形成由天线周边向核的能量阶梯，这对于保证高效的能量传递是必不可少的. 因而要彻底弄清天线系统的结构与功能，包括连接蛋白在内的结构研究是非常必要的，这部分的研究工作肯定将成为本领域的研究重点之一.

基于X射线晶体结构数据(如色团之间的距离，相互取向等)和实际测量的各个色团吸收和荧光光谱数据，可以用计算机模拟方法计算体系中能量传递动力学，从而对传递的途径和传递的时间常数给予清楚的说明[24～27]. 此外对机理的推定也提供一些启示，如对C-藻蓝蛋白三聚体，计算和飞秒级时间分辨光谱测量都表明有飞秒级的动力学组分，说明藻胆蛋白中各色团之间的相互作用更可能是Forster描述的很弱相互作用，对藻胆蛋白中存在强相互作用的假说提出了疑问；计算机模拟方法清楚地显示出能量传递的动态过程，如由荧光偏振测量得到C-藻蓝蛋白的亚基间没有能量传递的结论[28]，然而计算表明亚基间存在分量较大的能量传递，但是以部分可逆的方式进行，难以用现在的物理测量方法检验出来；从计算机模拟结果还可以获得不同聚集态的藻胆蛋白能量传递动力学组分数的规范，即组分数目应等于体系中独立给体种类数，这为时间分辨光谱数据的分解提供了依据.

2 超快速时间分辨光谱

自1978年Porter等人[29]首次把皮秒级时间分辨光谱应用于藻类天线系统中能量传递的研究以来，至今已有大量的研究工作. 众所周知，时间分辨光谱是以衰变的荧光形式表现的，其中包括荧光衰变，无辐射衰变和各种途径的能量传递，因而要从中了解能量递的信息，毫无例外地都需使用数学分析手段，除了早期的一些工作使用时间的1/2次方的函数拟合外，大部都是使用指数函数拟合，而由于解的不唯一问题使组分的正确解析一直成为一个困难的问题，正如Glazer指出的那样：无论以双指数，三指数或$\exp(-2At^{1/2})$函数拟合藻胆体中各组分的荧光衰变曲线都不能反映体系内发生的真实物理过程[30]. 求几个波长下联立解的所谓Global

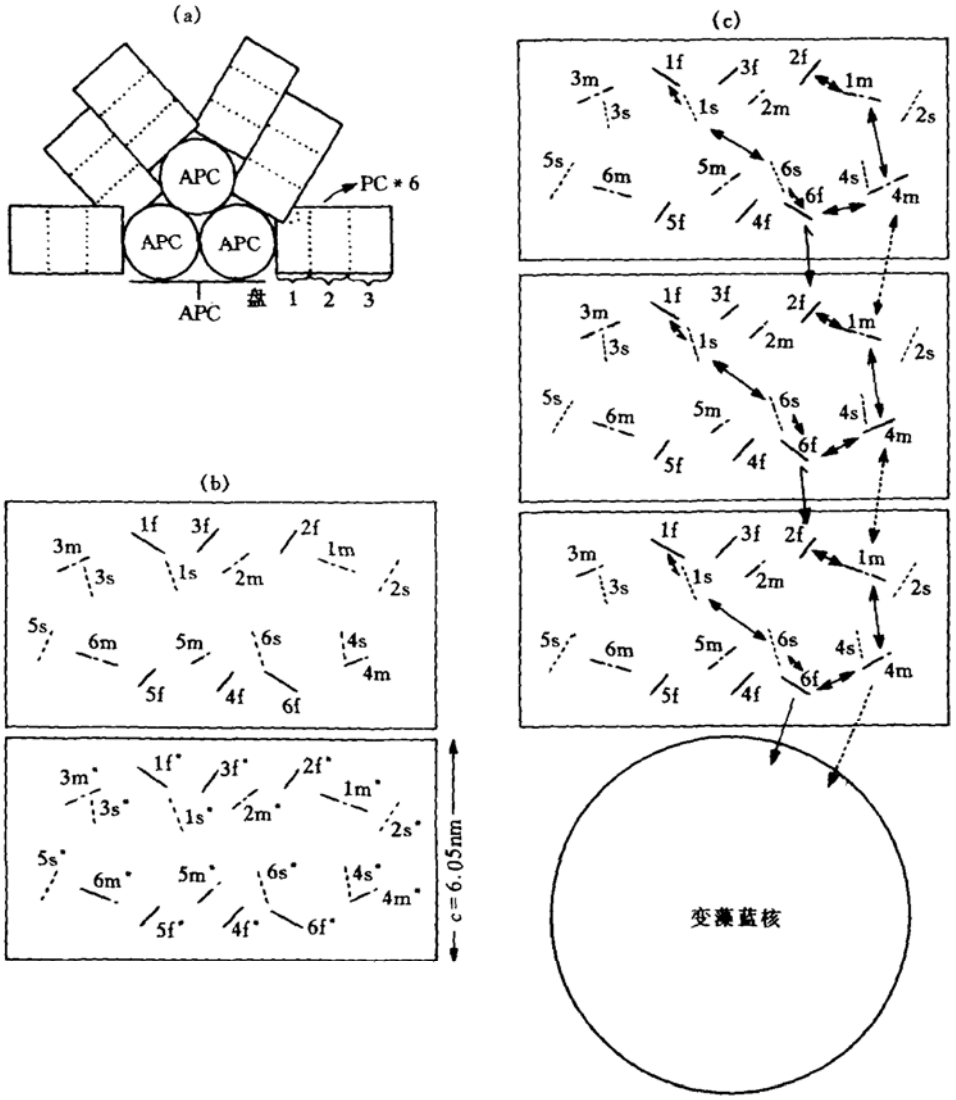


图 2　藻胆体结构(a)、杆内色团空间位置(b)和模拟获得的蓝藻藻胆体内能量传递示意图(c)
s——β 亚基中增感色团；f——β 亚基中荧光色团；m——α 亚基中的色团[27]

方法的初衷是为了解决解的不唯一的问题[31,32]，增加了部分约束条件，但它实质上还是指数拟合方法，仍然没有获得唯一解所需足够的条件．此外，各类藻胆蛋白吸收和荧光光谱互相重叠更增加了正确指认的困难．

在各种藻胆蛋白中，对蓝藻中的 C-藻蓝蛋白研究较多，这一方面因为它的组成和结构相对简单；另一方面由于 C-藻蓝蛋白是第一个获得高分辨晶体结构的藻胆蛋白，借鉴于结构的知识使得更容易说明它的功能．对于相同聚集态的 C-藻蓝蛋白，各个测量结果之间有很大的不同[33~36]．尽管如此，利用 ps 级和 fs 级[37]时间分辨光谱和结构分析数据，以及结合计算结果等方面的信息，目前已经能够比较清楚地说明 C-藻蓝蛋白中的能量传递过程．

藻红蓝蛋白(PEC)是存在于一些蓝绿藻的天线周边上一种捕光色素蛋白．X 射线晶体结构分析表明其三聚体与 C-藻蓝蛋白三聚体有相同的结构；与 C-藻蓝蛋白(C-PC)的主要区别在

于α亚基上的色团，在C-PC中是藻蓝胆素色团，在PEC中是藻紫胆素色团，这一差别造成PEC光谱性质和能量传递的特殊性[38~40]，藻紫胆素的光谱特性使其在藻红蓝蛋白中成为好的能量给体和差的能量受体，从能量吸收和传递的角度上看，藻红蓝蛋白比C-藻蓝蛋白能更好地吸收与传递光能[41].

变藻蓝蛋白是构成藻胆体核的复合物，它负责把来自藻胆体杆的光能传递到光合反应中心. 现在已知核系统由四种光谱形式的变藻蓝蛋白构成[42~49]，对三聚体的飞秒级时间分辨光谱的测量指出有一个约500fs的组分[50]，与PEC和C-PC的测量结果很相似，这归因于它们之间有相似的结构. 与C-PC和PEC不同的是：APC的单体上只有α_{84}和β_{84}两个色团，这样时间分辨光谱解析出的单体两个组分能得到适当的归属[51]，而三聚体时的四个组分则难以适当指认.

目前，已知晶体结构的变藻蓝蛋白三聚体只是四种光谱形式的变藻蓝蛋白中的一种，而且，要想了解核系统的整体功能，还要弄清这四种光谱形式蛋白之间的结构联系(即包括连接蛋白在内的整体结构)，核系统与前面的天线杆以及和内部的光合反应中心的结构联系，这些将是进一步研究的重点之一.

藻胆体中能量传递的定性顺序实际上不需要时间分辨光谱的知识，这个序列为：藻红(或藻红蓝)蛋白→藻蓝蛋白→变藻蓝蛋白→变藻蓝B(和变藻蓝Ⅰ)→光合反应中心(光系统Ⅱ和光系统Ⅰ)[52]，这可从各种藻胆蛋白的吸收光谱和藻胆体的荧光激发和发射谱推论出来[53]. 皮秒级时间分辨光谱的测量为藻胆体中的能量传递动力学增加了定量的知识[54,55]，这些工作指出藻胆体中能量传递以双途径进行，分别传递到天线的两个终端受体——APC-B和有色连接多肽. 图3给出蓝藻藻胆体低温时间分辨光谱及分解出的动力学组分，三维时间分辨光谱清楚地显示出能量传递的动态过程，解析组分的升高和衰减显示能量的得失.

时间分辨光谱的应用确实提供了了解藻类天线系统中的能量传递动态和定量的信息，由监测不同波长的荧光发射可以直观地观察到能量流随时间的变化. 然而，直接以时间分辨光谱定量确定藻胆蛋白和藻胆体中的能量传递动力学参数是困难的.

近几年来，一些对不同藻胆蛋白组成的复合物的重组和分离以及对连接蛋白结构和功能的研究指出了研究的方向. 这方面的研究工作有：变藻蓝蛋白三聚体及与相应的连接蛋白的重组[56]，天线与类囊体膜间连接多肽结构和功能研究[57,58]，以及杆-核复合物的研究[56,59,60]. 除此之外，利用LB膜技术对各种藻胆蛋白进行人为的排列和组装，研究结构比较清楚的体系中的能量传递动力学，使得对能量传递的机理有了更清楚的认识[61,62].

3 进一步研究展望

近年来，藻类天线系统的结构与功能研究确实取得了重大进展，皮秒和飞秒级时间分辨光谱和X射线晶体结构分析等方法的应用使这方面的研究工作从稳态发展到动态，由宏观发展到微观. 由定性发展到定量，尤其对不同聚集态的C-藻蓝蛋白，对其结构和功能的了解已经比较清楚；另一方面，尚有一些有待弄清的问题，这指出进一步研究的重点：藻类天线核心系统，包括几种不同光谱形式的变藻蓝蛋白的结构及它们之间的联系；包含连接蛋白在内的不同藻胆蛋白组成的复合物的结构与功能的研究，如藻红和藻蓝蛋白之间，藻蓝蛋白不同盘之间，藻蓝蛋白和变藻蓝蛋白之间，变藻蓝蛋白和藻胆体终端受体之间，天线的终端受体和光合反应中心之间. 这些问题的解决将使藻类天线系统的结构和功能获得彻底的了解. 为此，必须使

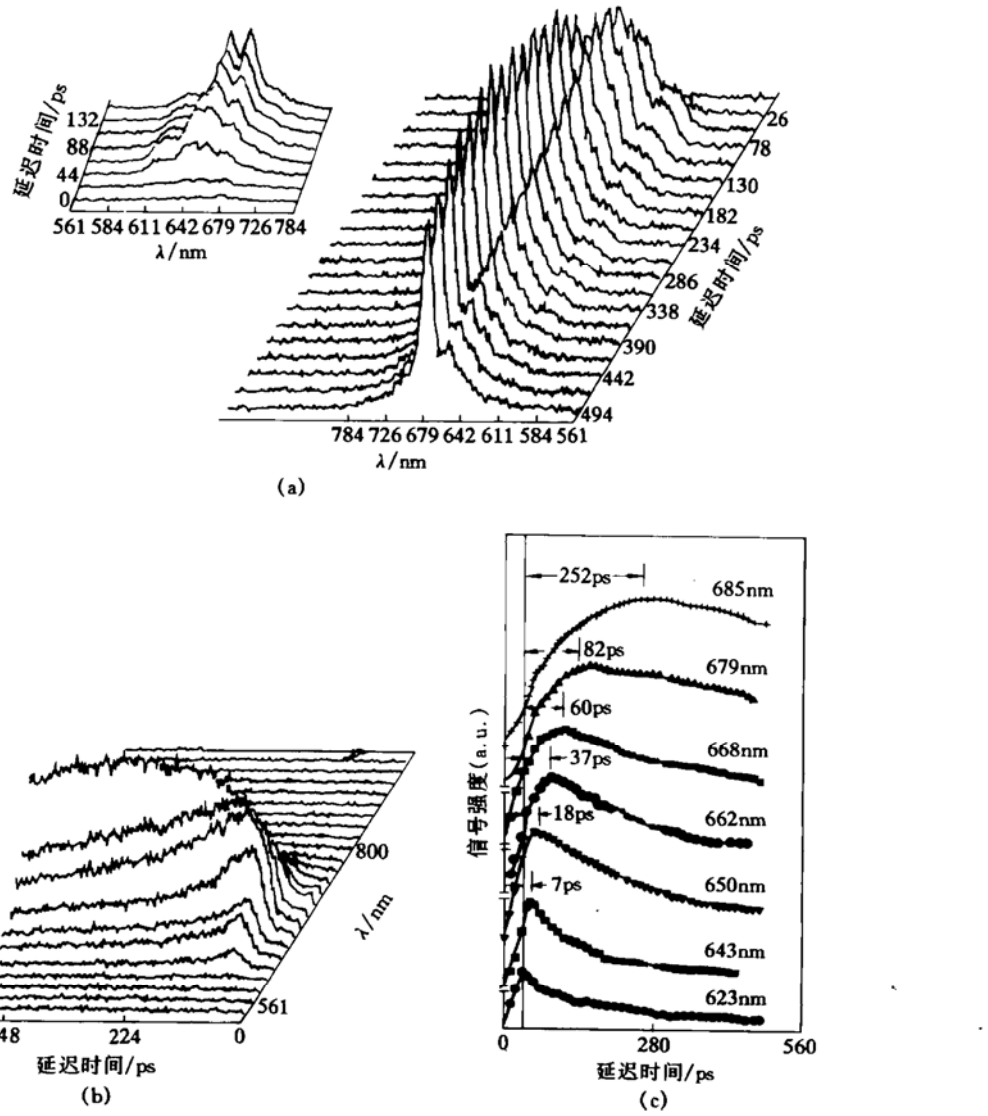


图 3　藻胆体低温(77K)时间分辨荧光光谱(a)和荧光动力学(b)及荧光升高和衰减过程(c)[55]

激发波长:580 nm

用现代各种方法的结合,如生物分离和分析技术、X 射线晶体结构分析等类似的结构测定技术、物理测量方法及计算机模拟计算方法,等等.

致谢　本工作为国家自然科学基金(批准号:39670065)资助项目.

参　考　文　献

1　Grabowski J, Gantt E. Excitation energy migration in phycobilisomes: comparison of experimental results and theoretical predictions. Photochem Photobiol, 1978, 28: 47

2　Tamita G, Rabinowitch E. Excitation energy transfer between pigments in photosynthetic cells. Biophys J, 1962, 2: 483

3　Bekasova O D, Romanyuk V A, Zvalinsky V I. Efficiency of excitation energy migration in phycobilisomes of red sea macroalgae. Biofizika, 1981, 26: 74

4　MacColl R, Guard-Friar D. Phycobiliproteins. Florida: CRC Press, 1987. 157～170

5 Holzwarth A R. Structure-function relationships and energy transfer in phycobiliprotein antennae (minireview). Physiologica Plantarum, 1991, 83: 518～528

6 喻玲华,曾繁杰,蒋丽金,等. 海洋多管藻的R-藻红蛋白的亚基组成和发色团含量. 生物化学与生物物理学报, 1990, 22:221～227

7 Cheng Lingjiang, Ma Jinshi, Jiang Lijin. The complexes formed by biladiene a, b-compounds with zinc ions and their application in determination of the chromophore composition of α and β subunits of R-phycoerythrin. Photochem Photobiol, 1990, 52: 1 071～1 076

8 林启山,张建平,曾繁杰,等. 海洋红藻和蓝藻中的变藻蓝蛋白结构特征的比较. 植物生理学报, 1992, 18:253～259

9 Cheng Lingjiang, Jiang Lijin. Circular dichroism and stereochemistry of the phycobilins and their derivatives. J Photochem Photobiol B: Biol, 1992, 15: 343

10 Lin Qishan, Zeng Fanjie, Zhang Jianping *et al*. Comparative studies on structure characteristics of C-phycocyanins from marine red and blue-green algae. Chinese Science Bulletin, 1993, 38: 71～74

11 黄 岩,秦 利,朱晋昌,等. 红毛菜中两种不同分子量的R-藻红蛋白的性质比较. 生物化学与生物物理学报, 1993, 25:433～440

12 张季平,万柱礼,汪曙光,等. 多管藻中R-藻蓝蛋白的分离、结晶和初步晶体学研究. 生物物理学报, 1995, 11:481～484

13 Chang Wenrui, Wan Zhuli, Jiang Tao, et al. Crystal structure of R-phycoerythrin from *Polysiphonia urceolato* 0.5 nm resolution. Progress in Natural Science, 1994, 5: 202—211.

14 Deisenhofer J, Epp O, Miki K, et al. Structure of the protein subunits in the photosynthetic reaction center of *Rhodopseudomonus viridia* at 3Å resolution. Nature, 1985, 318: 618

15 Schirmer T, Bode W, Huber H. Refined three-dimensional structures of two cyanobacterial C-phycocyanins at 2.1Å and 2.5Å resolution. J Mol Biol, 1987, 196: 677

16 Duerring M, Huber R, Bode W, et al. Refined three-dimensional structure of phycoerythrocyanin from the cyanobacterium *Mastigocladus laminosus* at 2.7Å. J Mol Biol, 1990, 211: 633～644

17 Ficner R, Huber R. Refined crystal structure of phycoerythrin from *Porphyridium cruentum* at 0.23 nm resolution and isolation of the γ subunit. Eur J Biochem 1993, 218: 103～106

18 Ficner R, Lobeck K, Schimdt G, et al. Isolation, crystallization, crystal structure analysis and refinement of B-phycoerythrin from the red alga *Porphyridium sordidum* at 2.2Å resolution. J Mol Biol, 1992, 228: 935～950

19 Brejc K, Ficner R, Huber R, et al. Isolation, crystallization, crystal structure analysis and refinement of allophycocyanin from the cyanobacterium *Spirulina platensis* at 2.3Å resolution. J Mol Biol, 1995, 249: 424～440

20 Debreczeny M P, Sauer K. Monomeric C-phycocyanin at room temperature and 77K: resolution of the absorption and fluorescence spectra of the individual chromophores and energy transfer rate constants. J Phys Chem, 1993, 97: 9 852

21 Forster T. Comprehensive Biochemistry, Vol 22. Amsterdam: Elsevier, 1967. 61～80

22 Sauer K, Scheer H, Sauer P. Forster transfer calculation based on crystal structure data from *Agmenellum quadruplicatum* C-phycocyanin. Photochem Photobiol, 1987, 46: 427～440

23 Sauer K, Scheer H. Exitation transfer in C-phycocyanin: forster transfer rate and exciton calculations based on new crystal structure data for C-phycocyanin from *Agmenellum quadruplicatum* and *Mastigocladus laminosus*. Biochim Biophys Acta, 1988, 936: 157～170

24 Zhao Jingquan, Zhu Jinchang, Liang Lijin. Computer simulation on kinetics of primary process in photosynthesis—— Ⅱ. Energy transfer in the β subunits and monomers of C-phycocyanins. Science in China, Series B, 1994, 37: 831～841

25 Zhao Jingquan, Zhu Jinchang, Jiang Lijin. Computer simulation on kinetics of primary process in photosynthesis—— Ⅲ. Energy transfer in the trimers and hexamers of C-phycocyanins. Science in China, Series B, 1994, 37: 1 313～1 320

26 Zhao Jingquan, Zhu Jinchang, Liang Lijin. Computer simulation on kinetics of primary process in photosynthesis—— Ⅳ. Excitation energy transfer in phycobilisomes from blue-green alga. Science in China, Sseries B, 1995, 38: 39～49

27 Zhao Jingquan, Zhu Jinchang, Jiang Lijin. Study on the energy transfer processes in phycobilisomes from blue-green alga by the use computer simulation approach. Biochim Biophys Acta, 1995, 1 229: 39～48

28 Mimuro M, Fuglistaller P, Rumbeli R, et al. Functional assignment of chromophores and energy transfer in C-phycocyanin

isolated from the thermophilic cyanobacterium *Mastigocladus laminosus*. Biochim Biophys Acta, 1986, 848: 155～166

29 Porter G, Tredwell C J, Searle G F W, et al. Picosecond time-resolved energy transfer in *Porphyridium cruentum*. Part I. In the intact alga. Biochim Biophys Acta, 1978, 501: 232～245

30 Glazer A N. Light harvesting by phycobilisomes. Ann Rev Biophys Biophys Chem, 1985, 14: 47

31 Holzwarth A R, Bittersmann E, Reuter W, et al. Studies on chromophore coupling in isolated phycobiliproteins. III. Picosecond excited state kinetics and time-resolved fluorescence spectra of different allophycocyanins from *Mastigocladus laminosus*. Biophys J, 1990, 57: 133～145

32 Suter G, Holzwarth A R. A kinetic model for the energy transfer in phycobilisomes. Biophys J, 1987, 52: 673～683

33 Holzwarth A R, Wendler J, Suter G W. Picosecond energy transfer kinetics and timeresolved fluorescence spectra of C-phycocyanin from *Synechococcus* 6301 as d function of the aggregation state. Biophys J, 1987, 51: 1～12

34 Wendler J, John W, Scheer H, et al. Energy transfer in trimeric C-phycocyanin studied by picosecond fluorescence kinetics. Photochem Photobiol, 1986, 44: 79～85

35 Xia Andong, Zhu Jinchang, Jiang Lijin, et al. Energy transfer kinetics in C-phycocyaninfrom cyanobacterium *Westiellopsis prolifica* studied by pump-probe technique. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1991, 179: 558～564

36 Xia Andong, Zhu Jinchang, Wu Huaju, et al. Time-resolved polarized absorption of C-phycocyanin from the cyanobacterium *Westiellopsis prolifica*. J Photochem Photobiol, B: Biol, 1993, 19: 111

37 Gillbro T, Sharkov A V, Kryukov I V, et al. Forster energy transfer between neighbouring chromophores in C-phycocyanin trimers. Biochim Biophys Acta, 1993, 1 140: 321～326

38 Maruthi Sai P S, Siebzehnrubl S, Mahajan S, et al. Phycoerythrocyanins from *Westiellopsis prolifica* and *Nostoc rivulare*: characterization of the phycoviolobilin chromophore in both states. Photochem Photobiol, 1992, 55: 119～124

39 Maruthi Sai P S, Siebzehnrubl S, Mahajan S, et al. Fluorescence and circular dichroism studies on the phycoerythrocyanins from the cyanobacterium *Westiellopsis prolifica*. Photochem Photobiol, 1993, 57: 71～75

40 Hucke M, Schweitzer G, Holzwarth A R, et al. Studies on chromophores coupling in isolated phycobiliproteins. IV. Femtosecond transient absorption study of ultrafast excited state dynamics in trimeric phycoerythrocyanin complexes. Photochem Photobiol, 1993, 57: 76～80

41 Zhao Jingquan, Zhu Jinchang, Jiang Lijin. Computer simulation on kinetics of primary process in photosynthesis of algae——V. Excitation energy transfer in phycoerythrocyanins. Science in China, Series B, 1996, 39: 519～526

42 Holzwarth A R, bittersmann E, Reuter W, et al. Studies on chromophore coupling in isolated phycobiliproteins. III. Picosecond excited state kinetics and time-resolved fluorescence spectra of different allophycocyanins from *Mastigocladus laminosus*. Biophys J, 1990, 57: 133～146

43 Gottschalk L, Lottspeich F, Scheer H. Reconstitution of allophycocyanin from *Mastigocladus laminosus* with isolated linker polypeptide. Phtochem Photobiol, 1993, 58: 761～767

44 Csatorday K, MacColl R, Csizmadia V, et al. Exciton interaction in allophycocyanin. Biochemistry, 1984, 23: 6 466～6 470

45 Zilinskas B A, Greenwald L S, Bailey C L, et al. Spectral analysis of allophycocyanin I, II, III and B from *Nostoc* sp. phycobilisomes. Biochim Biophys Acta, 1980, 592: 267

46 Renter W, Wehrmeyer W. Core substructure in *Mastigocladus laminosus* phycobilisomes. Ⅱ. The central part of the tricylindrical core, Ap-CM, contains the "anchor" polipeptide and no allophycocyanin B. Arch of Microbiol, 1990, 153: 11

47 Renter W, Wehrmeyer W. Core substructure in *Mastigocladus laminosus* phycobilisomes. Ⅰ. Microheterogeneity in two of three allophycocyanin core complexes. Arch of Microbiol, 1988, 150: 534～540

48 Gindt Y M, Zhou J, Bryant D A, et al. Core mutations of *Synechococcus* sp. pcc 7002 phycobilisomes: a spectroscopic study. J Photochem Photobiol, B: Biology, 1992, 15: 75～89

49 Maxson P, Sauer K, Zhou J H, et al. Spectroscopic studies of cyanobacterial phycobilisomes lacking core polypeptides. Biochim Biophys Acta, 1989, 97: 40～51

50 Sharkov A V, Krynkov I V, Khoroshilov E V, et al. Femtosecond energy transfer between chromophores in allophycocyanin trimers from *Mastigocladus laminosus*. Chem Phys Lett, 1992, 191: 633

51 Beck W F, Sauer K. Energy transfer and exciton state relaxation process in allophycocyanin. J Phys Chem, 1992, 96: 4 658

~4 666

52 MacColl R, Guard-Friar D. Phycobiliproteins, Florida: CRC Press, 1987. 95~119

53 Gantt E, Lipschultz C A. Energy transfer in phycobilisomes from phycoerythrin to allophycocyanin. Biochim Biophys Acta, 1973, 292: 858

54 Mimuro M, Yamazaki I, Tamai N. Excitation energy transfer in phycobilisomes at −196C isolated from the cyanobacterium *Anabaena varisbilis* (M−3): evidence for the plural transfer pathways to the terminal emitters. Biochim Biophys Acta, 1989, 973: 153

55 Xia Andong, Zhu Jinchang, Jiang Lijin, et al. Time-resolved energy transfer proces in phycobilisomes at low temperature (77K). Science in China, Series B, 1995, 25: 277~282

56 Glauser M, Sidler W, Zuber H. Isolation, characterization and reconstitution of phycobiliprotein rod-core linker polypeptide complex from the phycobilisome of *Mastigocladus laminosus*. Photochem Photobiol, 1993, 57: 344~351

57 Redecker D, Wehrmeyer W, Renter W. Core substructure of the hemiellipsoidal phycobilisomes from red alga *P Cruentum*. Euro J Cell Biol, 1993, 62: 442

58 Glauser M, Bryant D A, Frank G, et al. Phycobilisome structure in the cyanobacteria *Mastigocladus laminosus* and *Anabaena* sp. pcc 7120, European J Biochem, 1992, 205: 907~915

59 Sandstrom A, Gillbro T, Holzwarth A R. Picosecond study of energy transfer within 18-S particles of AN112(a mutant of S 6 301) phycobilisomes. Biochim Biophys Acta, 1988, 933: 54

60 Renter W, Renter C N. Molecular assembly of the phycobilisomes from cyanobacterium *Mastigocladus laminosus*. J Photochem Photobiol, B: Biol, 1993, 18: 51~66

61 He Jinan, Jiang Lijin, Jiang Long, et al. Orientational and spectroscopic studies of Langmuir-Blodgett films of a photodynamic pigmental protein-allophycocyanin. Langmuir, 1996, 12: 1 840~1 845

62 He Jinan, Jiang Lijin, Jiang Long, et al. The Langmuir-Blodgett films of phycobiliproteins- I. The study of monolayer and the conformational changes of R-phycoerythrin. Science in China, Series B: Chemistry, 1996, 39(3): 327~336

(1996-07-19 收稿, 1996-11-07 收修改稿)