

光合作用

光子、激子、电子、质子、离子
与光合膜之间的相互作用

葛培根 编著

PHOTOSYNTHESIS

PHOTONS, EXCITONS, ELECTRONS,
PROTONS, IONS,
AND THEIR INTERACTIONS WITH
PHOTOSYNTHETIC MEMBRANE

BACON KE

光合作用

光子，激子，电子，质子，离子
与光合膜之间的相互作用

葛培根 编著

PHOTOSYNTHESIS

PHOTONS, EXCITONS, ELECTRONS,
PROTONS, IONS,
AND THEIR INTERACTIONS WITH
PHOTOSYNTHETIC MEMBRANE

BACON KE

责任编辑：汪明华

光 合 作 用

——光子、激子、电子、质子、离子
与光合膜之间的相互作用

[美] 葛培根 编著

安徽教育出版社出版发行

(合肥市金寨路 283 号 邮政编码：230063)

新华书店经销 安徽新华印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：23.5 插页：1 字数：450 000

1991 年 8 月第 1 版 1991 年 8 月第 1 次印刷

印数：1 500

ISBN 7-5336-1019-9/G·1467

定价：23.00 元

Dedicated to Keiko

[[[序]]]

光合作用一向是世人所瞩目的重要科学研究课题。在对这个现象研究的历程中，随着工作的深入，可以看到波浪式的起伏。在每次高潮时期必有新的突破，并会引出一个新的探索目标。在这里仅举几个例子说明：从 Warburg 将光物理学和光化学的理论和技術引入光合作用的研究和随后 Emerson 的双光增益效应的提出，以及 Calvin 的碳循环的发现，和 Arnon 的光合磷酸化及“原能力”的提出，都有力地说明了这一点。过去半个多世纪以来光合作用研究的进展是和其它自然科学，如物理学，化学，以及生物学的其它分支学科一样，不但是波浪式的，并且均是“后浪推前浪”地造成阶段式的“后浪高于前浪”的突破和提出新的更深入的探索目标。

光合作用研究的这种波浪式的进展，在本世纪 60 年代开始到 70 年代后期又孕育着一个新高潮：从“双光效应”所引伸的两个光系统的假说以及通过对光合膜的亚显微结构及分子水平的结构与功能的研究而提出的两个光系统（PSI，PSII）和对存在于其中的“核心结构”，“光合作用反应中心”的设想和寻找。

正在这时（60 年代后期），我们开始筹备恢复光合作用研究工作，并着手制定一个较有长远打算的中心工作目标。经过一段时间的文献阅读和讨论，我们初步提出了计划的主攻方向：光合膜及光合反应中心的结构及其与原初反应过程的关系。

在这个广泛阅读文献的过程中，我发现了世界各地的光合作用研究机构中一个极负盛名的在美国设立的独立的以光合作用为主的研究所（实验室）：Charles F. Kettering Research Laboratory。该室在本世纪 20 年代成立，在 60，70 年代中由于他们人才济济，先后罗致了美国内外许多优秀学者，而他们研究光合作用的主导思路是当时发展浪潮的高峰，并又和我们初步设想的主攻方向近似，所以我在中美建交前夕（1979）在和代表团一同到美国进行学术考察时特别重点地访问了 Kettering 实验室。在访问时证实了我对该室的估计，增强了我对预想的光合作用研究方向的信心。也正是由于那次访问时有幸见到主持该室光合作用研究的高级研究员，著名的物理化学，生物物理学家和精密仪器设计家，在 40 年代后期赴美工作的美籍华人葛培根（Bacon Ke）教授。我和他“一见倾心”，当即以中国科学院植物研究所名誉教授职位聘请他于 1980 年夏来北京对我所及专程由全国各地来京的中青年光合作用工作者作为时六周的〈光合作用原初反应研究的现状和展望〉讲座，实验工作的示范及仪器的调整和使用等。由于他的认真工作，使参加学习的人员得益匪浅，收获极大。应与会者的要求，以后培根教授又重来北京讲学及示范。他为我们装配了他亲自设计的光合作用研究专用的动力学分光光度计，并赠送给我们许多光合作用研究必需的特殊设备和书刊。

由于这几次讲学及示范的成功，各方面向培根教授提出要求将这一系列讲座的内容结合光合作用机理的研究近况及发展趋势以一部专著的形式撰写出来，供从事光合作用研究的专业工作者阅读，也可供国内大学生物系和生物物理学及生物化学等学科的系或专业的高年级学生及研究生作为教材。对于那些非生物系毕业的有志于从事光合作用研究的研究生及工作人员，这本书也可作为一本基本教材和参考书。为了克服初学者在语言上的障碍，使们能更顺利地体会书中内容，科学方法和逻辑思维，培根教授用我们共同使用的母语——中国文字写出了这本书。

这是一本首次以中文写作的，由一位有国际声誉的专家自己的工作经验为基础的光合作用专著。我个人认为这部专著的出版有很大的意义：它不但具有很高的学术水平，而且其写作方式是很有特色的。更重要的是，它也为光合作用的教材和以后我国科学教材的“中国化”提供了一次好的经验。这部著作是培根教授对我国光合作用研究及其发展的一大贡献，它必将在推进我国光合作用研究方面起重要作用。它也是中美科学交流的一个好的范例。

在结束这篇序言之前，我还想倾吐几句我对培根教授的“私房话”。培根教授的祖籍是江西，但出生在汉口，因此我们可以说是“同乡”。他先后毕业于战时在四川的上海同济大学（1943）和武汉大学（1945），我也曾在武汉大学教学及进行呼吸作用和光合作用研究。因此，我虽比培根年龄大二十来岁，但我们毕竟是“同根”（他于1947年去美国深造（M.S., University of Michigan; Ph.D., Wayne State University）后定居美国）。我对他十分钦佩，不只是因为他在光合作用这方面有很高的国际声望，也不只是因为他还是一位物理化学家和精密仪器设计及制作家，更令我向往的是，他是一位有高度修养的艺术鉴赏及收藏家。他的岳父真山孝治是一位颇负国际盛名的日本书画家。在培根美国的住宅中藏满了中外（特别是中国及日本）古今名人字画。保存这些书画的那座他和夫人惠居住的“老房子”本身就是一件“古董”——旧金山大地震后遗存下来的希有住宅之一。因此培根的住宅本身也就是一个私人的艺术珍品收藏馆。这种生活环境熏陶的结果也反映在本书的中文书名〈光合作用〉四个字的字体中：这四个中文字是培根从我国书法大师吴昌硕的手笔复制本用特殊扫描技术和电子计算机辑集而成的！

汤佩松

中国科学院植物研究所光合作用研究室

1989年7月，北京

[[[作者前言]]]

汤佩松教授在序言里对光合作用在近几十年代的进展情况给我们很好的介绍和很深远的见识。所以我在这里也用不着复述。佩松教授特别介绍作者写这本书的起源。回忆十年前接佩松教授的邀请回国讲学，这个过程给与作者一个希有的机会与国内的光合作用工作者接触，我个人非常珍重这个特殊场合。

作者退休后一年回国参加在扬州举行的光合作用学术会议时接到写书的建议。其实写作这样一本书也正是我一直希望为中国科学工作者和青年学生所作的一点小贡献。但是由于作者住外四十余年来从无机会用中文写作，同时中文近年来的改变和语气上的微妙变化，令我对写书事有点犹豫。在这些问题方面，我觉得特别幸运的是得到中国科学院植物研究所同行友人戴云玲教授和北京农业大学物理系李崇慈教授（兼任植物研究所教授）的热诚支持和慷慨援助，允诺检阅和修正我书稿的文字。只有在这些条件下，我才敢开始进行写作。允许我在这里对戴教授和李教授对这本书的关键性贡献表示真诚的感谢。

在本书的写作过程中，作者有幸得到各方面的协助。首先我特别要提的是中科院植物研究所光合作用研究室各位同事友人的关怀和鼓励。作者退休后继续接收世界各地光合作用工作者发表的新报告。当制书需要特殊绘图时，作者总可依赖他们的慷慨协助。作者好友藤茂宏教授（日本冈山大学）1982年出版的“光合成”书内载有一页独特的“光合作用研究进展史。”当作者请他允许我采用时，他不但立即允诺，并在1985年将表页修订增补。作者在此也要特表感谢。作者退休后在日本和加州居住时当地各个大学的图书馆也对作者的工作大有帮助。

关于本书的印行，为了避免校对的费时，同时保留书稿材料的准确度，作者认为照相平版印刷方法印刷最为适当。本书的出版，作者得到好友，武汉大学化学研究所同窗，现南开大学化学系陈荣佛教授的协助和联系，在此表示感谢。安徽教育出版社编辑汪明华先生对出版和发行事业的热诚协助和认真办理，作者在此表示诚挚的感谢。

作者在撰稿期间和联系出版的过程中，不断地补充最新的光合作用研究的重要新结果和参考文献。在最终脱稿前补充的材料包括今年三月中旬发表的天线集光蛋白复合体的电子检验结果！目前世界各地光合工作非常活跃，同时还有些重要课题，例如光合放氧过程，如何模拟天然光合作用去制作人工光合系统以捕获和贮藏太阳能等，还没有完全解决。我相信中国的光合作用工作者在不久的将来一定能对这些科学领域作重要的贡献。作者知识有限，欢迎读者批评和教正。

葛培根 1991年5月于加州三藩市

[[[[[用书简介]]]]]

为了便于理解,除完全目录外,书首载有简明的分区和分区分章目录。仅分区和分区分章目录有对应英译。

名词用笔画或适当字首编制索引难以尽如人意,也不便使用。因此作者请读者用完全目录代作索引。每章开始也有各章的完全目录。书的最后有名词总表和名词缩写总表。

外文翻译的名词或缩写标记在本文内。参考和脚注用星号“*”标记。
名词翻译,缩写,脚注,和参考都可在各页最下边找到。

本书第 99 页上图 III.5.7. 为细菌反应中心的立体图形;第 103 页上图 III.5.7A 和 III.5.9A 相应地为细菌反应中心色素分子的立体结构和色素分子/蛋白的立体结构的彩色图形。书末附录中描写操练用眼睛直接看立体影形的方法。

[[[[[制书简介]]]]]

文字处理:用 IBM-型 (80386) 电子计算机。

文字处理软件:ChinaStar, JHL Research, Inc., Anaheim, California, U.S.A.

英字体软件:Scalable Laserjet Fonts (Bitstream 和 Glyphix)

印字加速操作用的软件:Torq (Laser Tools Corp.)

(复)制图机:Scanjet (Hewlett Packard).

图形扫描软件:Scanning Gallery (Hewlett Packard).

文图制板胶片:Overhead Transparencies #5182 (Avery) 或 #92285 (Hewlett Packard).

书面设计:自作。中文书名由吴昌硕大师手笔复制。

字体采自“吴昌硕字典”(裘毛政雄编,日本东京雄山阁出版株式会社 1985 年版)。

书末“光合作用研究进展史”年表采自藤茂 宏:“光合成”(东京大学出版会 1982 年版)。

年表于 1985 年经藤茂 宏教授增补,由作者译成中文。藤茂 宏教授现任日本冈山大学生物系名誉教授和日本植物生理学会会长。

某些章末有过半页空白时,为了不浪费纸张,作者冒昧任意复制些喜爱的国画以充填空白为读者欣赏。为符合于本书题材,复制画品题材完全是中国白菜!

[[[简明分区目录]]]

I. 光合作用 — 概论	[1]
II. 光合器的组织及其与光能间的相互作用	[8]
III. 光合细菌	[56]
IV. 光系统 II	[119]
V. 光系统 I	[225]
VI. 光合磷酸化 — 质子与类囊体膜间的相互作用	[324]

名词总表 (英汉对照) [337]

名词缩写总表 [344]

附录: 操练直接用眼睛看立体影形 [348]

光合作用研究进展史年表 (书末附页)

[[[简明分区分章目录]]]

I. 光合作用 — 概论 [1]

II. 光合器的组织及其与光能间的相互作用 [8]

- II. 1. 光合器里的集光色素分子 [8]
- II. 2. 光能的吸收, 传递和捕获 [14]
- II. 3. 光合膜的组成和功能 [21]
- II. 4. 色素分子蛋白复合体 [28]
- II. 5. 藻胆蛋白和藻胆体 [42]

III. 光合细菌

- III. 1. 光合细菌原初电子供体 P870 [56]
- III. 2. 光合细菌原初电子供体 P870 氧化侧的反应 [62]
- III. 3. 原初电子受体 — 早期的实验结果 [69]
- III. 4. 原初电子受体 — 高速测量的新结果 [81]
- III. 5. 光合细菌反应中心的化学构造和晶体结构 [91]
- III. 6. 绿色光合细菌 — 绿菌和丝状滑移绿菌 [105]

IV. 光系统 II

- IV. 1. 光系统 II 的氧化侧 [119]
- IV. 2. 光系统 II 的还原侧 — 稳定的“原初”电子受体 [125]
- IV. 3. 光系统 II 的还原侧 — 中间电子受体 [132]
- IV. 4. 光系统 II 的快速原初反应 [144]
- IV. 5. 光合放氧 [151]
- IV. 6. 位于光系统 II 反应中心与放氧复合体 (S-态) 之间的电子载体 [200]
- IV. 7. 光系统 II 亚叶绿体, 有放氧活性的颗粒, 和蛋白复合体 [213]

V. 光系统 I

- V. 1. 光系统 I 和它的原初电子供体 P700 [225]
- V. 2. 光系统 I 的电子受体 — 具有一定光谱特性的物质“P430”的发现 [231]
- V. 3. 光系统 I 的电子受体 — 与类囊体膜结合的铁硫中心 (FeS-A, B) 的发现 [246]
- V. 4. 光系统 I 的早期电子受体 — A_2 或 FeS-X [259]
- V. 5. 光系统 I 的原初电子受体 — A_1 和 A_0 [277]
- V. 6. 光系统 I 的早期电子受体 — A_1 [291]
- V. 7. 光系统 I 亚叶绿体颗粒, 反应中心复合体和它的多肽成分与结构 [304]
- V. 8. 细胞色素 $b_6 f$ 复合体和光系统 I 外围的活动多肽 [312]
- V. 9. 光系统 I 原初光化学反应和电子流通 — 总结 [321]

VI. 光合磷酸化 — 质子与类囊体膜间的相互作用 [324]

I. 光合作用 — 概论 [1]

- I. 1. 光合作用 — 简介 [2]
- I. 2. 光合作用在生物圈里的意义 [5]
- I. 3. 光合作用贮藏的能量 [5]
- I. 4. 地球上的能量平衡 [6]

II. 光合器的组织及其与光能间的相互作用 [8]

II. 1. 光合器里的集光色素分子 [8]

- II. 1. 1. 叶绿素分子 [8]
- II. 1. 2. 辅助色素分子 [10]
- II. 1. 3. 叶绿素类和辅助色素分子的光谱性质 [11]
- II. 1. 4. “光合单位”概念 [11]
- II. 1. 5. Emerson 增强效应 [12]

II. 2. 光能的吸收, 传递和捕获 [14]

- II. 2. 1. 光能的吸收 [14]
- II. 2. 2. 吸收光能所产生的激发态 [15]
- II. 2. 3. 色素分子被光能激发后的命运 [16]
 - II. 2. 3. 1. 激发能在“分子内”的能量传递 — 荧光和磷光发射 [16]
 - II. 2. 3. 2. 激发能在“分子间”的能量传递 — 激子传递和共振传递 [17]
- II. 2. 4. 激发能的捕获 [18]

II. 3. 光合膜的组成和功能 [21]

- II. 3. 1. 叶绿体的类囊体膜 [21]
- II. 3. 2. 生物膜模型 [22]
- II. 3. 3. 类囊体膜的脂质成分 [23]
- II. 3. 4. 探索蛋白复合体在类囊体膜里位置的方法 [24]
- II. 3. 5. 内源性蛋白复合体在类囊体膜里的位置 [26]

II. 4. 色素分子蛋白复合体 [28]

- II. 4. 1. 绿色植物的集光色素蛋白复合体 [30]

- II. 4. 1. 1. 光系统 II 集光叶绿素蛋白复合体 [31]
- II. 4. 1. 2. 光系统 I 集光叶绿素蛋白复合体 [33]
- II. 4. 2. 含类胡萝卜素的蛋白复合体 [33]
- II. 4. 3. 光合紫色细菌的集光色素蛋白复合体 [35]
- II. 4. 4. 绿色细菌的集光色素蛋白复合体 [37]
- II. 4. 5. 绿硫细菌的集光细菌叶绿素 a 蛋白复合体 [39]
- II. 4. 6. 绿色细菌的超巨型集光结构 - 简注 [40]

II. 5. 藻胆蛋白和藻胆体 [42]

- II. 5. 1. 藻胆蛋白 [42]
 - II. 5. 1. 1. 藻胆蛋白的构成 - 生色团和藻胆蛋白亚单位 [42]
 - II. 5. 1. 2. 藻胆蛋白的氨基酸组成 [45]
 - II. 5. 1. 3. 藻胆蛋白的光谱性质 [45]
- II. 5. 2. 藻胆体 [47]
 - II. 5. 2. 1. 藻胆体的生成和形状 [48]
 - II. 5. 2. 2. 藻胆体的空间结构 - 简观 [49]
 - II. 5. 2. 3. Synechococcus-6301 藻胆体的空间结构 [50]
 - II. 5. 2. 4. 藻胆体的光谱性质 [51]
- II. 5. 3. 藻胆体里的能量传递 [53]
- II. 5. 4. 藻胆体在类囊体膜上的结构 [54]

III. 光合细菌 [56]

III. 1. 光合细菌原初电子供体 P870 [56]

- III. 1. 1. 光合细菌原初电子供体 P870 的吸收光谱性质 [57]
- III. 1. 2. 光合细菌原初电子供体 P870 的圆振二向色光谱 [58]
- III. 1. 3. 光合细菌原初电子供体 P870 的电子顺磁共振信号 [59]
- III. 1. 4. 光合细菌原初电子供体 P870 的电子核磁共振谱 [60]

III. 2. 光合细菌原初电子供体 P870 氧化侧的反应 [62]

- III. 2. 1. 光合细菌原初电子供体 P870 照光氧化的后果 [62]
- III. 2. 2. 光合细菌细胞色素的低温氧化反应 [62]
- III. 2. 3. 光合细菌细胞色素与反应中心叶绿素间的直接电子传递 [64]
- III. 2. 4. 光合细菌的细胞色素 - 综观 [65]
- III. 2. 5. 用 (哺乳动物) 细胞色素 c 作次级电子供体的模型反应 [65]

III. 3. 原初电子受体 — 早期的实验结果 [69]

- III. 3. 1. 认为铁是原初电子受体的实验观察 [70]
- III. 3. 2. 泛醌的化学分析, 提取, 重组和替换 [72]
- III. 3. 3. 铁原子的提取, 重组和替换 [74]
- III. 3. 4. 原初电子受体醌和次级电子受体醌的反应方式 [75]
- III. 3. 5. 原初和次级电子受体醌的氧化还原性质 [78]

III. 4. 原初电子受体 — 高速测量的新结果 [81]

- III. 4. 1. 用纳秒时间分辨率测量的新结果 [81]
- III. 4. 2. 用皮秒时间分辨率测量的新结果 — 中间电子受体 “I” 的发现 [82]
- III. 4. 3. 光化学积累还原的中间电子受体 I^- (BPheo $^-$) [83]
- III. 4. 4. 还原的中间电子受体 I^- (BPheo $^-$) 的电子顺磁共振 [85]
- III. 4. 5. BChl 可能是比 BPheo 更早的电子受体? [86]
- III. 4. 6. 含细菌叶绿素 b 的绿色红假单胞菌里的中间电子受体 I [87]
- III. 4. 7. 反应中心叶绿素三重线态的生成; [BPheo/BPheo $^-$] 偶的中点电位 [87]
- III. 4. 8. 简略摘要 [89]

III. 5. 光合细菌反应中心的化学构造和晶体结构 [91]

- III. 5. 1. 光合细菌反应中心复合体的化学构造 [91]
 - III. 5. 1. 1. 光合细菌反应中心的蛋白质构造 [91]
 - III. 5. 1. 2. 球形红假单胞菌反应中心多肽的氨基酸成分和顺序 [92]
 - III. 5. 1. 3. 反应中心多肽亚单位的“多肽链沿链亲水度”对应图 [94]
- III. 5. 2. 光合细菌反应中心的晶体 [96]
 - III. 5. 2. 1. 光合细菌反应中心的结晶 [96]
 - III. 5. 2. 2. 用 X-射线测量的反应中心晶体结构 — 色素分子和电子载体 [98]
 - III. 5. 2. 3. 反应中心里多肽的构造 [100]
 - III. 5. 2. 4. 球形红假单胞菌反应中心的晶体结构 [102]
 - III. 5. 2. 5. 进化观点简论 [102]

III. 6. 绿色光合细菌 — 绿菌和丝状滑移绿菌 [105]

- III. 6. 1. 绿菌 [106]
 - III. 6. 1. 1. 绿菌复合体的制备和光化学性质 [106]
 - III. 6. 1. 2. 绿菌的原初光化学反应 — 反应中心叶绿素 P840 的氧化 [107]
 - III. 6. 1. 3. 绿菌反应中心叶绿素自旋极化三重线态的生成 [108]

- III. 6. 1. 4. 早期对绿菌电子受体的探讨 [109]
- III. 6. 1. 5. 绿菌的电子受体 — 用高速测量吸收光谱变化的结果 [109]
- III. 6. 1. 6. 绿菌原初电子受体的化学特性 [111]
- III. 6. 1. 7. 总结 [112]
- III. 6. 2. 丝状滑移绿菌 [113]
- III. 6. 2. 1. 丝状滑移绿菌的光合膜和反应中心复合体的制备和光化学性质 [113]
- III. 6. 2. 2. 丝状滑移绿菌的光化学反应 — 反应中心叶绿素 P865 的氧化 [114]
- III. 6. 2. 3. 丝状滑移绿菌的次级电子受体 — 甲基萘醌 [115]
- III. 6. 2. 4. 丝状滑移绿菌的原初电子受体 — 吸收光谱变化的皮秒测量 [115]
- III. 6. 2. 5. 总结 [117]

IV. 光系统 II [119]

IV. 1. 光系统 II 的氧化侧 [120]

- IV. 1. 1. 光系统 II 的原初电子供体 P680 [120]
- IV. 1. 2. 光系统 II 氧化侧的一个异常电子供体 — 细胞色素 b559 [122]

IV. 2. 光系统 II 的还原侧 — 稳定的“原初”电子受体 [125]

- IV. 2. 1. 光系统 II 的稳定电子受体 [125]
- IV. 2. 2. 电子受体 Q 还原时的吸收光谱变化 [126]
- IV. 2. 3. “C550”的性质 [127]
- IV. 2. 4. 光系统 II 电子受体 Q 的化学特性 [128]
- IV. 2. 5. 光系统 II 电子受体 Q (Q_A) 的氧化还原性质 [128]
- IV. 2. 6. 光系统 II 次级电子受体 Q_B 的氧化还原性质 [138]

IV. 3. 光系统 II 的还原侧 — 中间电子受体 [132]

- IV. 3. 1. 光系统 II 中间电子受体 Pheo 的发现 [132]
- IV. 3. 2. 嗜热蓝藻放氧颗粒的 Pheo 光化学累积 [134]
- IV. 3. 3. Pheo⁻ 的电子顺磁共振信号 — Pheo 和 PQ·Fe 间的相互作用 [135]
- IV. 3. 4. 光系统 II 反应中心里的铁和醌含量 [138]
- IV. 3. 5. 电子受体 Q 的电子顺磁共振信号 [139]
- IV. 3. 6. 光系统 II 的三重线激发态 [140]
- IV. 3. 7. 中间电子受体 Pheo 的中点电位 [142]
- IV. 3. 8. 有比 Pheo 更早的电子受体 ? [142]
- IV. 3. 9. 光系统 II 反应中心和光合细菌反应中心的类似处 [142]

IV. 4. 光系统 II 的快速原初反应 [144]

- IV. 4. 1. 伴随光系统 II 原初反应的快速荧光变化 [144]
- IV. 4. 2. 用纳秒时间标度测量光系统 II 原初反应的快速吸收光谱变化 [145]
- IV. 4. 3. 用皮秒时间标度测量光系统 II 在正常情况下光照产生的原初电荷分离 [146]
- IV. 4. 4. 光系统 II 原初反应和还原侧的电子传递 - 总结 [149]

IV. 5. 光合放氧 [151]

- IV. 5. 1. 导言 [151]
- IV. 5. 2. 放氧的动力学 [152]
 - IV. 5. 2. 1. 放氧的一些重要实验结果 [152]
 - IV. 5. 2. 2. Kok 的学说 [153]
 - IV. 5. 2. 3. 放氧中心的独立性 [154]
 - IV. 5. 2. 4. 放氧产率曲线的周期波形幅度衰减的原因 [155]
 - IV. 5. 2. 5. S-态的转变速度 [155]
 - IV. 5. 2. 6. S-态的稳定性和它的转变 [156]
 - IV. 5. 2. 7. S-态的氧化还原性质 [156]
 - IV. 5. 2. 8. 去活化反应 [158]
- IV. 5. 3. 与放氧有关的化学变化 [160]
 - IV. 5. 3. 1. 放氧时质子的释放 - 早期的实验结果 [160]
 - IV. 5. 3. 2. 放氧时质子的释放 - 目前的看法 [160]
 - IV. 5. 3. 3. 用 pH 指示染料测量质子释放 [161]
 - IV. 5. 3. 4. 用照光时的光谱变化测量叶绿体里水分子氧化时质子释放的速度 [161]
 - IV. 5. 3. 5. 叶绿体里水分子氧化时质子释放的速度 [163]
- IV. 5. 4. 锰与放氧的关系 [166]
 - IV. 5. 4. 1. 锰与放氧的关系 - 早期实验结果 [166]
 - IV. 5. 4. 2. 从叶绿体里提取锰的各种方法以及锰提取后对放氧的影响 [166]
 - IV. 5. 4. 3. 早期提取锰时作的电子顺磁共振实验 [167]
 - IV. 5. 4. 4. 叶绿体内锰的含量和存在状态 [168]
 - IV. 5. 4. 5. 放氧时锰的氧化态变化 [170]
 - IV. 5. 4. 6. S₂-态中锰复合体的电子顺磁共振谱 [172]
 - IV. 5. 4. 7. 用 X-射线吸收光谱测定锰价变化 [173]
- IV. 5. 5. 与放氧时 S-态变化间接有关的吸收光谱变化 [175]
 - IV. 5. 5. 1. 与 S-态变化间接有关的吸收光谱变化 - P680⁺ 重新还原的动力学 [175]
 - IV. 5. 5. 2. S-态转换时对邻近色素分子引起的电色光谱位移 [179]

- IV. 5. 6. 与放氧时 S- 态变化直接有关的吸收光谱变化 [182]
 - IV. 5. 6. 1. Tris 处理过的光系统 II 放氧颗粒中 $Q \rightarrow Q^-$ 和 $Z \rightarrow Z^+$ 的吸收光谱变化 [182]
 - IV. 5. 6. 2. 与放氧时 S- 态变化直接有关的吸收光谱变化 [184]
 - IV. 5. 6. 3. 直接测量锰氧化还原时吸收光谱变化的动力学 [185]
 - IV. 5. 6. 4. 用 $NH_2 OH$ 处理过的放氧颗粒测量锰氧化还原时的吸收变化 [186]
- IV. 5. 7. S- 态与延迟发光和热致发光的关系 [189]
 - IV. 5. 7. 1. 延迟发光 [189]
 - IV. 5. 7. 2. 热致发光 [190]
- IV. 5. 8. 光合放氧 - 总结 [195]
 - IV. 5. 8. 1. 光合放氧过程摘要 [195]
 - IV. 5. 8. 2. 含锰的放氧中心模型 [197]
- IV. 6. 位于光系统 II 反应中心与放氧复合体 (S- 态) 之间的电子载体 [200]
 - IV. 6. 1. 光系统 II 的次级电子供体 Z [200]
 - IV. 6. 1. 1. 从光谱变化动力学测量的结果 [200]
 - IV. 6. 1. 2. 放氧复合体失去活性后对电子供体 Z 还原 $P680^+$ 速度的影响 [201]
 - IV. 6. 1. 3. 光系统 II 电子供体 Z 氧化还原时的吸收光谱变化 [202]
 - IV. 6. 2. 光系统 II 电子供体 Z 的电子顺磁共振谱 [204]
 - IV. 6. 2. 1. 早期的电子顺磁共振谱实验结果 [204]
 - IV. 6. 2. 2. 从动力学实验得到的新型 SII 信号 - SII_f 和 SII_w [205]
 - IV. 6. 2. 3. SII_f 的新动力学实验结果 [207]
 - IV. 6. 2. 4. SII 的化学根源和化学性质 [208]
 - IV. 6. 2. 5. 有关 SII 化学根源的新发展 [210]
 - IV. 6. 2. 6. SII 的氧化还原性质 [211]
- IV. 7. 光系统 II 亚叶绿体, 有放氧活性的颗粒, 和蛋白复合体 [213]
 - IV. 7. 1. 从菠菜制备的光系统 II 亚叶绿体和它们的性质 [213]
 - IV. 7. 1. 1. 用 Triton 从菠菜制备的亚叶绿体 - TSF2a [213]
 - IV. 7. 1. 2. 与 TSF2a 类似的别种亚叶绿体 [214]
 - IV. 7. 2. 从嗜热蓝藻和红藻制备的有放氧活性的光系统 II 颗粒 [214]
 - IV. 7. 2. 1. 从嗜热蓝藻制备的有放氧活性的光系统 II 颗粒 [214]
 - IV. 7. 2. 2. 从红藻制备的有放氧活性的光系统 II 颗粒 [216]
 - IV. 7. 3. 从菠菜制备的有放氧活性的光系统 II 颗粒 [217]
 - IV. 7. 3. 1. 用去垢剂制备有放氧活性的光系统 II 颗粒 [217]
 - IV. 7. 3. 2. 有放氧活性的“内翻外”类囊体膜 [217]
 - IV. 7. 4. 更简单而有放氧活性的光系统 II 颗粒的制备 [218]
 - IV. 7. 5. 光系统 II 核心复合体的蛋白质成分 [219]
 - IV. 7. 6. 光系统 II 反应中心里的外源性蛋白质 [228]

V. 光系统 I [225]

V. 1. 光系统 I 和它的原初电子供体 P700 [225]

- V. 1. 1. P700 的化学特性 [226]
- V. 1. 2. P700 的氧化还原电位 [228]
- V. 1. 3. P700 的吸收系数 [229]

V. 2. 光系统 I 的电子受体 — 具有一定光谱特性的物质“P430”的发现 [231]

- V. 2. 1. 导言 [231]
- V. 2. 2. 1971 年发现的膜结合的铁氧还蛋白和具有一定光谱特性的物质“P430” [232]
 - V. 2. 2. 1. P430 的发现 [232]
 - V. 2. 2. 2. P430 的吸收光谱差 [233]
 - V. 2. 2. 3. 用动力学证实 $P700^+$ 和 $P430^-$ 相应地是原初氧化剂和原初还原剂 [234]
 - V. 2. 2. 3. A. $P700^+$ 和 $P430^-$ 的重结合 [234]
 - V. 2. 2. 3. B. 循环电子流 [235]
 - V. 2. 2. 3. C. 非循环电子流 [236]
 - V. 2. 2. 3. D. $P700^+$ 的累积 [239]
 - V. 2. 2. 3. E. $P430^-$ 的累积 [247]
- V. 2. 3. P430 的化学和物理性质 [241]
 - V. 2. 3. 1. $P430^-$ 对氧不敏感 [241]
 - V. 2. 3. 2. P700 和 P430 反应时的照光强度饱和现象 [241]
 - V. 2. 3. 3. P700 和 P430 反应的量子产率 [242]
 - V. 2. 3. 4. P700 和 P430 反应的上升速度 [242]
 - V. 2. 3. 5. P430 的吸收光谱 [243]
 - V. 2. 3. 6. P430 的氧化还原电位 [243]

V. 3. 光系统 I 的电子受体 — 与类囊体膜结合的铁硫中心 (FeS-A, B) 的发现 [246]

- V. 3. 1. 与类囊体膜结合的铁硫蛋白 [246]
 - V. 3. 1. 1. 铁硫蛋白 — 简介 [246]
 - V. 3. 1. 2. 与类囊体膜结合的铁硫蛋白的电子顺磁共振信号 [247]
 - V. 3. 1. 3. 结合的铁硫蛋白在类囊体膜里的位置 [247]
 - V. 3. 1. 4. 与类囊体膜结合的铁硫蛋白的化学性质 [249]
 - V. 3. 1. 5. 与膜结合的铁硫蛋白的氧化还原滴定 [249]