

生物生产力 和光合作用测定技术

〔英〕J. 库姆斯 D. O. 霍尔 S. P. 朗 J. M. O. 斯卡洛克 主编



科学出版社

生物生产力 和光合作用测定技术

[英] J. 库姆斯 D. O. 霍尔 主编
S. P. 朗 J. M. O. 斯卡洛克
邱国雄 等译
戴云玲 邱国雄 校



科学出版社

1986

内 容 简 介

本书是联合国环境规划署已举办了七次的“生物生产力和光合作用测定技术”国际培训班的教材。书中各章分别由正从事该领域研究且有成就而又担任培训班教学工作的当代知名科学家编写的,内容都是室内和田间实际工作所必须具备的知识。

书中向读者介绍从细胞器、细胞、单叶到天然植物各级水平的生物量、光合反应及环境因素的重要测定技术和方法,以及适用的最新仪器(如小型红外二氧化碳分析仪和叶圆片氧电极等)。本书既介绍经典的生长分析方法,也介绍酶学的生化技术,当涉及有关植物生理及微气候的新理论时,也向读者论述有关的物理原理和数学概念。

本书既可作为广大农林和生物科学工作者的技术手册,也可作为高等院校生物系、农林院校教学的重要辅助教材。

J. Coombs, D. O. Hall, S. P. Long, J. M. O. Scurlock
**TECHNIQUES IN BIOPRODUCTIVITY AND
PHOTOSYNTHESIS**

2nd Edition
Pergamon press, 1985

生 物 生 产 力 和光合作用测定技术

[英] J. 库 姆 斯 D. O. 霍 尔 主编
S. P. 朗 J. M. O. 斯卡洛克

邱国雄 等译

戴云玲 邱国雄 校

责任编辑 梁淑文

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1986 年 9 月第一次印刷 印张: 20 1/2 插页: 2
印数: 0001—3,000 字数: 484,000

统一书号: 13031·3393

本社书号: 5213·13—6

定价: 5.00 元

中文版序

能为我们的手册的中文版写几句话作为导言,我感到很荣幸。通过参与几年来在中国进行的合作研究和在中国举办的培训班,我确信这些植物生产力和光合作用测定技术会在科学研究和实际应用中得到进一步的使用。描述了最现代化的测定技术的手册中文版的问世,对这些技术的广泛使用来说是很重要的。

这本手册的全体作者和编者都非常感谢中国科学院上海植物生理研究所和北京植物研究所为这本手册中文版的翻译和出版所作的努力。手册中文版的问世,永久地铭记了手册作者和编者在生物生产力和光合作用方面的真正的兴趣。

D. O. 霍尔

1986年4月23日

It is an honour to write a few words as an introduction to the Chinese edition of our Manual. Having participated in both collaborative research and a training course in China over the last few years I am convinced of the potential which exists to further use these techniques in plant productivity and photosynthesis for both research and practical application. It is important for this widespread use that a Chinese version is available with the most modern techniques described.

All of the editors and authors are very grateful to the Shanghai Institute of Plant Physiology and Institute of Botany, Academia Sinica for undertaking the translation and publication. It should be a lasting tribute to their sincere interest in bioproductivity and photosynthesis.

D. O. Hall

1986.4.23

本书第二版和第一版一样,是为联合国环境规划署和伦敦大学的凯恩斯学院合作的一个课题(FP/4102—83—06[2405])举办的培训班而编写的。以下的组织也参与部分工作和资助:联合国教科文组织(UNESCO);不列颠议会;Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung(奥地利);高等教育发展协会(爱尔兰),Federal University of Ceara, Fortaleza(巴西);King Mongkut's Institute of Technology, 曼谷(泰国)和中国科学院上海植物生理研究所(上海)。

序

这本《生物生产力和光合作用测定技术》一书是联合国环境规划署举办的“生物生产力和光合作用技术”培训班的实验教材。鉴于植物的光合作用及其生产力与当今人类所面临的食物、能源、资源和环境等问题有着非常密切的联系,因此,了解在各种条件下的农业、森林、草原及水系的生物生产力及光合作用情况具有十分重要的意义。这本书为生物生产力及光合作用的测定提供了合适的方法,并且已经在巴西及泰国等地举办的培训班中实际应用过。1985年8月下旬至9月中旬,联合国环境规划署在中国科学院上海植物生理研究所举办了第七届“生物生产力和光合作用测定技术”培训班。为适应我国广大读者的需要,中国科学院植物研究所戴云玲等同志,于1984年组织了赵福洪、许春辉、张其德、毛大璋、张大宏、邱泽生、郭楚、周云龙、任思实、龚划时等同志对本书的第一版进行了翻译。并由上海植物生理研究所王天铎同志参与校订。当翻译工作接近结束时,我们收到了联合国环境规划署举办此培训班的负责人 Hall 教授送来的此书第二版的校样,内容较第一版增添了很多。于是,我们立即组织人力,在第一版译稿的基础上对第二版进行了翻译。在科学出版社大力协助加速排印的情况下,终于在原版书第二版只出版半年左右的时间里,中译本就问世了。这样,不但1986年7月下旬至8月下旬由中国科学院上海植物生理研究所举办的类似的培训班的学员能利用这本书为教材,而且还可使全国广大的生物和农业科学工作者也都能有这本最新出版的现代的实验手册作为参考书籍。为此,我们既要感谢 Hall 教授对我国科技发展的大力支持,也要感谢为保证此中译本能如此迅速出版而辛勤劳动的同志们。

沈允钢

1986年1月

第二版前言

光合作用研究领域最近进展真是十分迅速,因此,不可避免地需要很快地加以修订本书。本书第一版已得到读者的普遍欢迎。但即使在第一版出版时,所有作者都已感到如有一个修订版就更好。我们认为,这个愿望已在这第二版中实现了。

微电子学的最新进展,革新了田间的和室内的科学测定方法。小型化及不昂贵的微型计算机的普及已改变了研究工作的面貌。而新一代的用于电池供电的数据贮存器和微处理机把这种变化推得更远。不论在发达国家或发展中国家中,这些新技术中有许多是特别适用于光合作用及生产力的田间及室内的测定工作。因为这种装备很轻便,可携带,可靠,并且大多不依赖于城市电源。

所有原作者都被邀请来改写他们曾承担过的章节。这种改写也包括增加完全新的方法,诸如利用可携带的红外气体分析仪作田间的光合测定(第6章)和叶圆片氧电极的应用(第7章)。此外,鉴于最近的进展,对原书章节作了修改。

对本书的章节次序,我们也按最合逻辑的顺序重新排列。每一章都按同一格式编写:先有一段引言,解释这些方法与植物生产力的关系,在章节的末尾则写了若干实验操作规程。为了便于参照一些标准的分析操作,在第17章中加以汇集。对所有研究工作者都感兴趣的内容则是新增添的附录。这附录收集了有关光合作用研究中所需的田间及室内使用的各类仪器的性能、技术指标及价格范围的资料。

和第一版出版时相同,为使本书再版,我们欢迎来自读者对改进本书的建议。对增补本书新内容,对仪器的改进,对测定方法以及校正等各方面的建议我们表示衷心的感谢。

D. O. Hall

J. M. O. Sourlook

1985年3月

(邱国雄译)

第一版前言

本手册是联合国环境规划署资助的一个课题的副产物。这个课题是为测定植物的生产力,特别着重为田间及室内光合测定技术提供培训而设立的。这个培训课程已经教授了许多学员利用最好最可靠的方法解决他们自己的问题。这些学员是在这样的环境条件下实习的,这些条件与他们在本国遇到的情况相似。这个培训班在培训过程中还经常利用那些主办研究所制造的或采用的设备。本书的内容是按培训课目的需要而编排的,它既不求面面俱到,也不仅仅是讲授人员的讲义。事实上,这手册反映培训过程中讲授人员与学员之间的相互教学关系,其内容既包括学员们已经感兴趣的领域,也包括他们希望去学习掌握的那些领域。

本培训班是有目的地为弥合一个实际存在的差距而设立的,这就是人们对温暖地区植物生产力的知识有着不断的增长,这种形势的重要性又为这地区的许多国家要解决所面临的主要困难的迫切性所反映,即能源价格上涨,农林业生产增长对能源需求的关系,以及能源生产的地区性分布等。这些困难对那些缺少化石燃料矿藏,又缺乏工业基础来取得经济收入,支付不断增长的债务的国家尤为严重。对这类国家,唯一可行的解决办法是更大程度依靠当地的能源如地热、水力发电和太阳能。就大多数热带国家而言,最好的方案(在有些情况下还是唯一的办法)看来还是利用生长的植物去捕获太阳光能,也就是收集植物的生物量。要把植物作为化石燃料的替代能源,目前还面临一个主要困难,即在那些土地、水及其他资料紧张的地区,还存在着粮食生产与能源作物争夺耕地的矛盾。奇怪的是,许多看来有着最好条件发展生物量生产的国家却就是那些面临最严重食物短缺的国家。这情况当然是许多交叉因素造成的结果,有些是农业上的,有些是社会上的,也有些是经济上的。然而,对任何地区,应该可以做到对作物或生态系统的生产潜力作出估计,并且对植物生产力定出一个可实现的具体目标。换句话说,应可做到对农、林、水体系的潜在生产力,用现有的作物和眼下正在开发成新作物种的光合能力作为依据来估测的。

要做到这点,必须在原生长地区条件下研究植物,而不能用在温带条件下的研究结果来延伸估测。例如,就在光合碳素还原循环阐明之后,许多学者认为再也没有可能在光合碳素同化方面有新的发现了,没有人预料还有一种适应高光强和更干旱地区的 C_4 植物的存在。同样,热带豆科植物与草共生关系中的固氮生物学与许多典型温带植物不同,而后者是过去许多文献中所常用的实验材料。

用新物种或者在新的生态系统中进行观察的研究工作者,如果缺少适当的培训,在得到与书本知识不同结果时,会与那些很可能与 C_4 光合同等重要新发现失之交臂。更为实际的问题是,研究工作者在田间用仪器作 CO_2 固定,光强或水分测定时,会碰到一些在他们未曾经历过的标定、技术或解释等方面的问题。这些培训活动已使一批经仔细挑选的年轻人进入这个领域,并与一些有经验的研究工作者相互交流,使他们获得为解决他们

自己工作中遇到的问题而需要的技巧, 并且, 也许更重要的是, 把他们所学到的知识在本国传播。

J. Coombs

D. O. Hall

1981年1月

(邱国雄 译)

引言

J. M. O. Scurlock, S. P. Long, D. O. Hall 和 J. Coombs

光合作用研究不仅受人们好奇心的推动,而且也受一个信念的推动,即它可以为增加植物生产力和作物产量提供一个手段。本书向读者提供一个引导来观察和解决光合作用在农作物和天然植被的植物生产力中能起多大作用的问题。

虽然光合作用对植物生产力而言是一个基本因素,然而,还有许多其他因素要影响田间植物的实际生产幅度。光合作用与植物生产力之间的定量关系必须首先加以考虑。对任何作物或天然植被而言,有四个因素决定生物量的净增加或所谓的净生产力(P_n),即入射光量(Q)、绿色植物器官截获光占全部光辐射的比值(β)、截获光经光合作用转化成生物量的效率(ϵ)和生物量的呼吸消耗(R)。这些因素与植物生产力之间的关系可以用下列简单数学式表示之。

$$P_n = Q \cdot \beta \cdot \epsilon - R$$

对作物而言,经济产量是指作物的生物产量中分配到有用的或收获的分额。对禾谷类植物而言则是籽粒,对树木则是树干,牧草则为地上部。植物分配到这些部分的干重在生物量总量中所占比值就是收获指数(harvest index)。许多作物的收获指数可以通过施肥和病虫害防治而提高,这些措施促使植物分配更多生物量到经济产量部分。通过遗传选育办法也可选出具有把较多生物量投入可收获组分的品种,这种办法所得的品种并不一定在总生产力上也得到提高。这种不增加生产力而只改变收获指数的办法对那些植物本身就是收获部分的作物,如饲料和生物量作物,就很少有应用价值。对所有作物而言,用改进收获指数来提高产量的限制极限是总生产力。在天然群落中,生产力也是最重要的因素,它既是野生物种驯化潜力的标志,也是人们向生态系统投入碳量和能量的能力的一个标志。

前面所写的数学式表明,生产力可以从三个方面来加以提高,除了入射光量(Q)是由气候决定,因而不受控制外,其余三项是可以改变的。

植物生物量中的已成长组织的维持呼吸和新生组织的生长呼吸是生产力的一个重要损失项。最近工作表明在草本植物的基因型之间有相当大的呼吸(R)差异。这提示,用科学方法选育更高生产力和产量潜力的基因型品种是有希望的。

光的截获效率是作物冠层的大小,结构和色素量的函数。每当作物的生产力有所增加时,都可归因于截获光量的增加。举例来说,向禾谷类作物施氮肥的主要效果是增加它的叶面积和持续时间,这当然就改进了整个生长季的 β 。大多数矿质肥料也是对叶片的生长和持续时间起作用而增产的,许多外界的胁迫因素则起着相反的效果。因此,光截获效率的提高主要是通过耕作技术的改进而得到的。I. R. 品系水稻则是一个重要的例外,它是从选育具有好的光截获冠层结构的基因型品种而得到增产的。

光能转化效率(ϵ)是由光合作用直接决定的,它也表示光合作用与生产力之间的直接关系。人们可以测量作物或天然植被的 ϵ 值,这是从若干天中或整个生长期间的生产量

单位, 符号和缩写

J. M. O. Scurlock 和 S. P. Long

随着生物生产力和光合作用研究在世界各地的开展, 加上许多工作者都是在发展中国家, 这就显得比以往任何时候更需要采用标准的方式写工作报告或论文。只有这样才能使得在不同国家, 甚至一个国家内不同研究单位进行的工作易于比较。下面是为怎样写一个好的实验工作报告所需的一套介绍和指南。

单 位

应该选用国际制(SI)单位而不要用任何其它单位, 尽管这些单位是合理的, 并且与现代协议相符。严格地说应该用 dm^3 取代 l , 用 cm^3 取代 ml , 虽然在许多生物化学工作中后者依然是习惯用法。单位既无复数形式也不加句号, 并且复合单位应该用指数形式给出(例如, 用 gm^{-3} 而不是 g/m^3)。始终如一地使用“百分之 $\times$ ”或者用“%”。特别注意要给光量子数和 CO_2 固定速率以正确的单位。这两者都是每秒每平方米微摩尔($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 这样就允许对两者的相互影响作直接的估算。

缩 写

所有缩写的专业词汇第一次提到时都该用全称给出, 并加上圆括号内的缩写; 在此以后则可全用缩写。

符 号

下列表格列举了本书前后所用的许多符号。为了避免含意上的模棱两可, 从最新约定的常用符号中仔细挑选了这些符号。甚至在最近的科学文献中会出现其它单位, 常会引起混淆。特别要注意的是文献中有时有用 F_o 代替表示 CO_2 同化速率的 A , 以及用 B 代替表示生物量干物质的 W 。

符号	参数	单位
A	CO_2 同化速率	$(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$
c	空气中 CO_2 浓度	$(\mu\text{mol mol}^{-1})$
O	作物生长速率	$(\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1})$
D	死植被的干重	(gm^{-2})
D	叶面积持续期	(d)
d	植物材料的损失或消耗	$(\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1})$
E	单位叶速率	$(\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1})$
E	蒸腾或蒸散速率	$(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$
E	消光系数	—
s	光合作用的太阳能转化效率	—

e	水蒸气分压	(kPa)
F	叶面积比	—
g	导度	(sm^{-1} 或 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
g_s	气孔导度	(sm^{-1} 或 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
I	辐射强度, 辐射能通量	(Wm^{-2})
I_a	冠层吸收的太阳辐射	(Wm^{-2})
I_b	冠层底层的太阳辐射	(Wm^{-2})
I_h	水平面上的太阳辐射入射	(Wm^{-2})
I_p	400—700 nm 范围内的太阳辐射	(Wm^{-2})
$L(LAI)$	叶面积系数	—
P_g	总初级生产	($\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)
P_n	净初级生产	($\text{g m}^{-2}\text{d}^{-1}$)
Q	光量子通量	($\mu\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)
R	呼吸损失之和	($\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$)
R^*	相对含水量	—
R	相对生长速率	($\text{g g}^{-1}\text{d}^{-1}$)
s	叶子的光合表面积	(m^2)
T	温度	($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
T_l	叶温	($^{\circ}\text{C}$)
T'	湿球温度	($^{\circ}\text{C}$)
W	生物量的干重(活植被)	(gm^{-2})
ψ	水势	(MPa)

下列字母作为下标时的含意是

- R 为根(地下部)
- S 为枝条(地上部)
- a 为灰分(矿质)
- d 为干燥的
- f 为新鲜的
- o 为有机的(非矿质的)
- t 为紧涨的

(王 琦 译 邱国雄 校)

参 考 文 献

- [1] Anderton, P., and P. H. Bigg (1972) Changing to the metric system; Conversion factors, symbols and definitions. National Physical Laboratory; H. M. Stationery Office, London.
- [2] Goldman, D. T. and R. J. Bell, eds. (1982) S. I.: The International System of Units, 4th edn. H. M. Stationery Office, London.
- [3] Incoll, L. D., S. P. Long and M. R. Ashmore (1977) S. I. Units and Publications in Plant Science. *Curr, Adv, Pl, Sci*, **28**, 331—343.
- [4] Royal Society (1975) Quantities, Units and Symbols, Report of the Symbols Committee. The Royal Society of London, U. K.

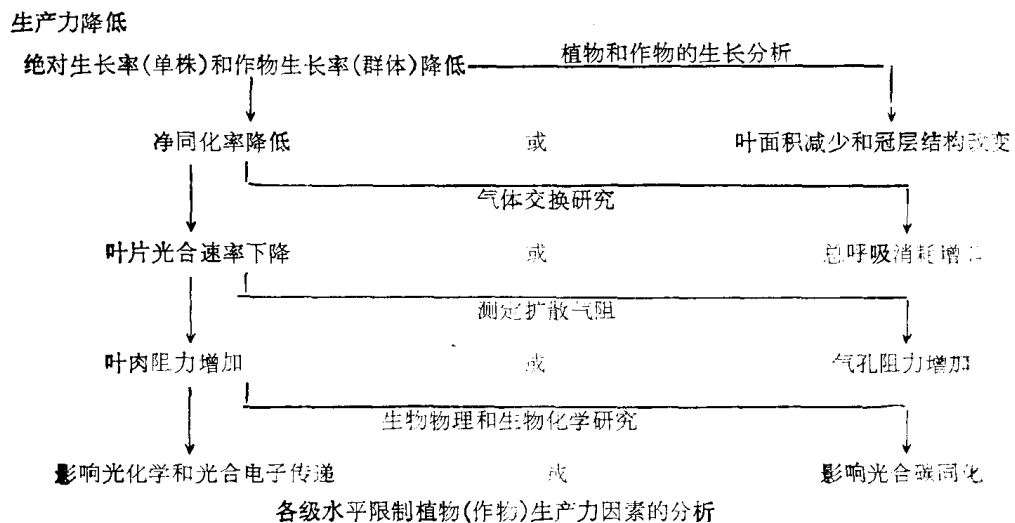
和冠层吸收到的累计光量计算而得到。对叶片则可用气体交换技术测若干分钟来得到 ϵ 。少数引人注目的例子表明有可能从增加物种的最高 ϵ 值($\epsilon_{\max}$)来增加生产量的。但是,目前还没有用育种方法改进物种在最适条件下 ϵ 值的事例。环境因素对改进 ϵ 可以起作用; CO_2 施肥是一个明显的例子。增加 CO_2 浓度大大降低光呼吸,这已在许多温室作物的生产力和经济产量中得到增产的效果。

理论上,改进 ϵ 是增加生产力和经济产量最吸引人的办法。如果这能通过遗传育种办法而做到,那么就可在不增施肥料情况下增加产量。目前,施肥是增产的主要手段。改进植物在最适条件下的 ϵ 虽然未成事实,但在非最适条件下,改进 ϵ 无疑是做得到的。许多外界的胁迫因素使光能转化效率下降,至少有短期的影响。特别值得一提的是高光强和低温,或高光强和干旱同时存在时,对光合机构的光抑制造成的破坏是显著的。将来,对改进作物将有一个重要的工作领域,这就是对胁迫因素更具不敏感特性的作物基因型的鉴定工作。

光合作用的能量转换是从光合膜捕获光量子开始,到 CO_2 同化,以及紧接着在叶绿体或其他地方的代谢而完成的。要了解如何才能提高效率就必需对光合过程各个水平的变化有一个较完整的知识。

研究的方法

当涉及高等植物中光能转化成生物量的效率时,人们的注意力常集中在以下几种问题中,即为什么作物的某种基因型在一种环境中比另一种环境生产更多,或者一种基因型在特定条件下生产力的极限是什么。为解决诸如此类问题所用的研究方法中常出现的错误是把植物的一部分作孤立的观察,而不是用植物的整体。例如,在分析为什么盐渍会降低生产力时,观察整株植物或整个群体要比观察单叶 CO_2 同化速率变化、离体二磷酸核酮糖羧化酶(RUBISCO)活力或者 $^{14}\text{CO}_2$ 在各种化合物中的渗入量更好些。即使在植物上已看到盐渍造成的变化,这些过程也未必是对生产力起限制作用的。产量的降低可能与盐渍对光合器官的影响并无关系;这种产量的下降也可能是通过叶面积或冠层结构的改变而造成光截获量的减少。因此最好的方法是遵循如下图所示的逻辑步骤来考察作物天然群落、或单株植物产量的限制因素。



本书的内容就是根据这样的从上到下的过程排列的, 前面几章是有关整体植物生产力的直接测定以及它的分析, 然后是一些重要因素如光、冠层结构、水分状态及叶片同化速率的分析方法的叙述, 然后对上述的光合过程的估价。用干物测定法来直接求得植物生产力可以引导到对植物代谢的分析, 因为测到的干物质只代表那些已经合成的和已经消耗的两者的之差。对内部代谢的深一步观察可以从光合过程的各个方面的生理及生化研究而得到, 这些过程包括有氮的同化(也是光合过程的一部分)及同时对氮代谢和碳代谢两者的分析。某些目前在实验室内常用的光合作用研究技术在本书的后几章中叙述, 这将会引导到一个更好了解能否改进光合效率和如何改进它的地步。

(邱国雄 译)

补充阅读文献

- [1] Beadle, G. L., S. P. Long, S. K. Imbamba, D. O. Hall and R. J. Olemba (1985) Photosynthesis in Relation to Plant Production in Terrestrial Environments. *Natural Resources and The Environment*, Vol. 18. U. N. E. P. /Tycooly Publishing, Oxford.
- [2] Charles-Edwards, D. A. (1982) *Physiological Determinants of Crop Growth*. Academic Press, Sydney.
- [3] Long, S. P. (1983) C₄ photosynthesis at low temperatures. *Plant Cell Env.* **6**, 345-363.
- [4] Osmond, C. B., K. Winter and S.B. Powles (1980) Adaptive significance of carbon dioxide cycling during photosynthesis in water-stressed plants. In: *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. (N. C. Turner and P. J. Kramer, eds.) pp. 139--154. Wiley-Interscience.
- [5] Robson, R. J. and J. Woledge (1981) Photosynthesis, Respiration and the Productivity of Temperate Forage Grasses. In: *Photosynthesis* (G. Akoyunoglou, ed.) Vol. VI. pp. 117-125. Balaban International. Philadelphia.

目 录

中文版序	i
序	iii
第二版前言	iv
第一版前言	v
引言(J. M. O. Scurlock, S. P. Long, D. O. Hall 和 J. Coombs)	vi
单位,符号和缩写(J. M. O. Scurlock 和 S. P. Long)	vix
第1章 植物生物量和净初级生产的测定(M. J. Roberts, S. P. Long, L. L. Tieszen 和 C. L. Beadle)	1
1.1 引言	1
1.1.1 定义	1
1.1.2 单位	1
1.1.3 原理	1
1.2 取样设计	2
1.2.1 充分随机方式	3
1.2.2 随机地块方式	3
1.3 地上部生物量(W_s)的测定	3
1.3.1 样方的数目、面积和形状	3
1.3.2 收获	5
1.3.3 分档	5
1.3.4 烘干	5
1.3.5 灰化	5
1.3.6 能含量的测定	5
1.3.7 碳素分析	7
1.4 地下生物量(W_R)的测定	8
1.4.1 取土法	8
1.4.2 分离和冲洗	8
1.4.3 死根和活根的分离	9
1.4.4 干重和有机物重	9
1.5 非破坏性的生物量测定	10
1.5.1 按茎叶量估算生物量法	10
1.5.2 遥感法	11
1.6 损失量的估算	12
1.6.1 分解	13
1.6.2 放牧	15
1.6.3 溢泌作用	15
1.7 净初级生产(P_n)的估测	16
1.8 实验工作	16
参考文献	19

第2章 植物生长分析(C. L. Beadle)	21
2.1 引言	21
2.2 基本原理	21
2.3 经典生长分析的各组分	22
2.3.1 相对生长速率(R)	22
2.3.2 单位叶面积速率(E)	22
2.3.3 叶面积比(F)	23
2.3.4 比叶面积和叶重比	23
2.3.5 叶面积系数(L)	23
2.3.6 作物生长速率(C)	24
2.3.7 叶面积持续时间(D)	24
2.4 函数生长分析	25
2.4.1 引言	25
2.4.2 Richards 函数	25
2.5 实验性观察	25
2.5.1 局限性	25
2.5.2 实验步骤	25
参考文献	26
第3章 植物微气候(M. B. Jones)	27
3.1 导论	27
3.2 辐射——太阳辐射和长波辐射	28
3.2.1 引言	28
3.2.2 辐射的测量	30
3.3 温度	32
3.3.1 引言	32
3.3.2 温度的测量	33
3.3.3 温度计的使用	35
3.4 湿度	35
3.4.1 引言	35
3.4.2 湿度的定义	35
3.4.3 湿度的测量	36
3.5 风	37
3.5.1 风速的测量	38
3.6 自动气象站	38
3.7 记录	38
3.8 实验工作	39
参考文献	39
第4章 冠层结构和光的截获(P. S. Nobel 和 S. P. Long)	41
4.1 引言	41
4.2 冠层中的辐射	41
4.2.1 冠层中光子通量密度的变化	41
4.2.2 对特定冠层的考虑	42

4.2.3	光补偿	43
4.2.4	冠层中光的测量	44
4.3	冠层结构的测量	45
4.3.1	叶面积系数	45
4.3.2	叶倾角	47
4.3.3	叶取向	48
4.3.4	茎和花序	48
参考文献		48
第5章	植物的水分关系(C. L. Beadle, M. M. Ludlow 和 J.L. Honeysett).....	50
5.1	气孔的导度	50
5.1.1	引言	50
5.1.2	用“阻力”还是用“导度”表示?	50
5.1.3	气孔孔隙的测量方法	50
5.1.4	水汽丧失速率	51
5.1.5	扩散气孔计的原理与校准	52
5.2	植物水分状况的测量	55
5.2.1	引言	55
5.2.2	含水量	55
5.2.3	水势	55
5.2.4	水势的组分	56
5.2.5	压力-体积曲线	57
5.3	土壤水分状况	57
5.3.1	引言	57
5.3.2	土壤含水量	58
5.3.3	水势	58
5.4	水分关系的实际测定工作	59
5.4.1	目标	59
5.4.2	材料	59
5.4.3	步骤	59
5.4.4	计算	60
5.4.5	数据分析	60
5.4.6	建议进行的其他工作	61
参考文献和进一步读物		61
第6章	植物 CO ₂ 同化的田间和实验室测量法 (S. P.Long 和 J. E. Hallgren).....	63
6.1	引言	63
6.1.1	CO ₂ 气体交换测量的特点	63
6.1.2	计量制、符号和单位	63
6.1.3	方法	63
6.1.4	封闭系统	64
6.1.5	半封闭系统	66
6.1.6	开放系统	67
6.2	红外气体分析	69