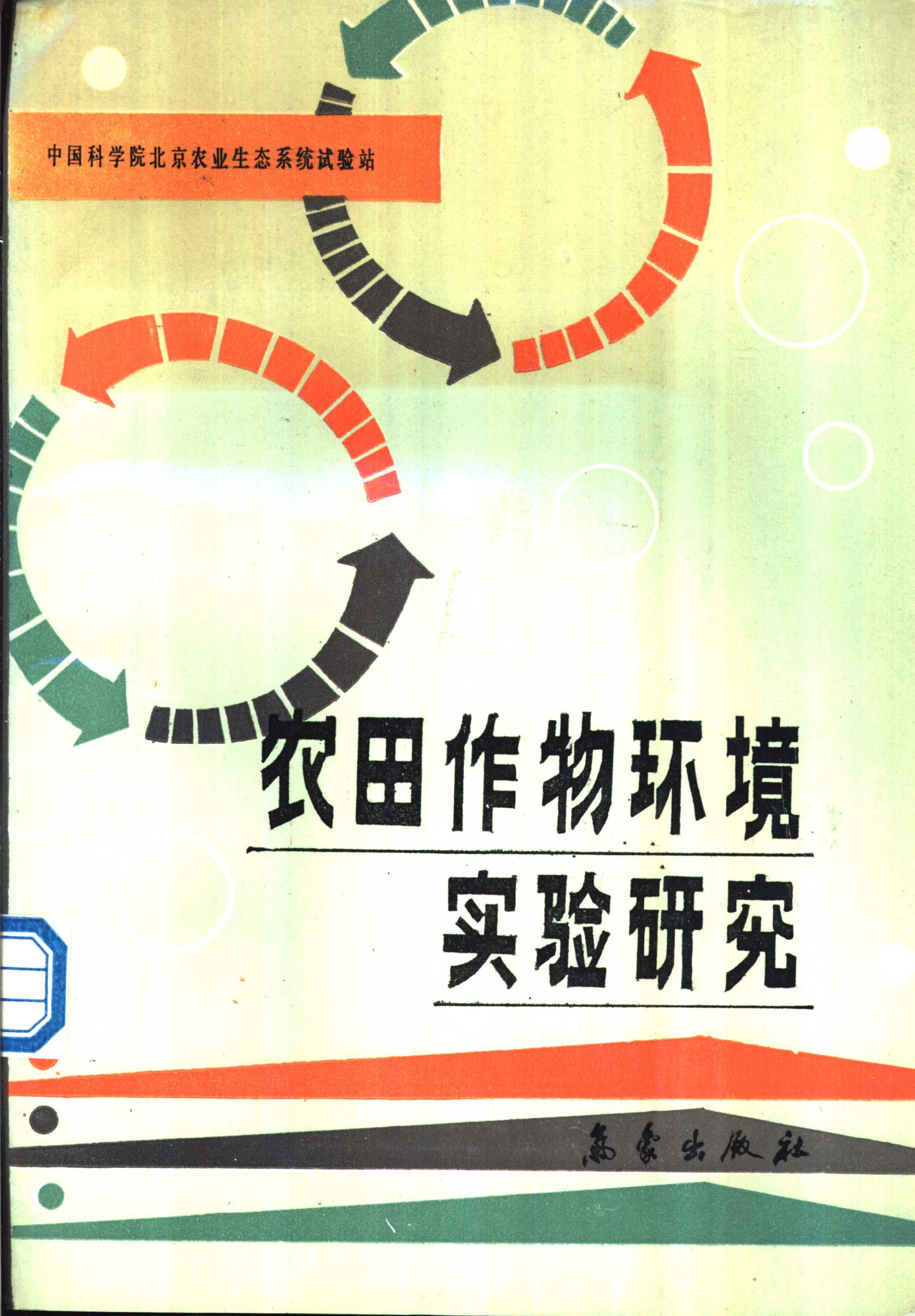


The background features a complex abstract design. It includes several large, stylized circular arrows in red, black, and green, some pointing clockwise and others counter-clockwise. There are also various geometric shapes like circles and rectangles in white, orange, and blue. The overall color palette is a mix of earthy and vibrant tones.

中国科学院北京农业生态系统试验站

# 农田作物环境 实验研究

气象出版社

# 农田作物环境实验研究

中国科学院  
北京农业生态系统试验站

## 内 容 简 介

本书是中国科学院北京农业生态系统试验站研究成果之一。精密的田间实验 是进行 农业生态系统基本规律研究的重要途径。该书以多年的田间实验资料为基础,以农业生态系统的理论为指导,深入探讨农田环境要素的变化规律,揭示作物的生长、产量形成与农田环境要素间的相互关系。全书共分五个部分:(1)农田环境辐射;(2)群丛辐射;(3)作物水分与气孔行为;(4)气象条件与作物生长;(5)作物土壤环境。上述各项研究为认识农业生态环境和农业实践提供了理论依据。

本书可供农业科技人员、农业大专院校师生、农业气象 研究 人员、实验地理学研究工作者和广大从事环境、生态研究的人员参考。

# 农田作物环境实验研究

中国科学院

北京农业生态系统试验站

责任编辑 潘根梯

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

航空工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/16 印张: 18.875 字数: 455千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

印数 1—1600 定价 14.00元

ISBN 7-5029-0388-7/P·0218

## 前 言

这是中国科学院北京农业生态系统试验站的第四本报告。前三本是1987年气象出版社出版的《农田生态系统能量物质交换》，1989年气象出版社出版的《农业生态环境研究》，1989年科学出版社出版的《中国地理基础数据：野外定位试验站卷（第2集）辐射观测数据集》。截至现在，试验站人员的工作成果十之八九都已收集在此四本书之内。未收集在内的是一部分已在或将在它处发表的文章、一些尚未脱稿的研究报告以及除辐射以外的观测资料。本书编者要我写一前言。建立试验站，我是主要发起人，并且参加过试验站一部分的领导与咨询工作，为此“略陈管见”，当然义不容辞。

如果我能“为所欲为”，我应当至少花一个月时间，细读四本书的内容。已经读过的也要重读。分析经验教训，指出哪些成果可以怎样用，哪些工作应当如何改进提高、补充或简化，哪些工作可以告一段落，哪些工作不必再做。即使我这样下了工夫，“一人之见短，二人之见长”，我的见解也不会都对，也需要与有关同志充分商讨，才能做出适当的衡量。时间不允许这样做，只能写“急就章”，聊以塞责。

建立试验站的倡议在1979年提出。当时中国科学院建立了三个农业现代化研究所，都打算建立试验站。在此以前，中国科学院曾设置不少试验站，绝大多数都由于种种原因不能保持下来。地理研究所在德州和石家庄当地原已存在的试验站、所借房借地，设置试验工作，在深县进行试验工作，我都是“始作俑者”，走了不少弯路，所得结果不能尽如所期望，教训很深。所以力主先建一个站，再续建其余两站，少走一些弯路，少一些浪费。中国科学院同意我的意见并决定先建立离北京最近的栾城站。由于中国科学院曾有指示：建立三个农业现代化研究所，各由一个老研究所负协助责任，指定地理研究所协助建立石家庄农业现代化研究所。因此，栾城试验站的筹划，地理研究所亦有参与的责任。1979年底，试验站选定用地，栾城县已同意照拨。后来建站计划因故稽延，而农村情势变化很大，迨议论已定，栾城县不同意照拨原已选定的站址，另拨的地地下70厘米即出现沙姜，不符合试验的要求。曾昭顺同志和我、还有一些同志由石家庄至北京、天津另觅站址曾费去不少时间。不图所有可以获得的地，或土质太砂、太粘，或地下水位太浅，或离地面不深即有砾石、沙姜，或在较近距离内有障碍物，近地面大气层结受到干扰，都不符合我们所要进行试验的要求。最后选定的站址也有一些缺点，但是一因所在乡积极性很高，愿意无偿借用土地，并予以种种便利，一取其就在地理研究所附近，可以节约许多费用。事先还曾向北京市了解城市建设计划，确定在站址附近没有安排会妨碍试验的用途。中国科学院鉴于“文革”以前，建站失误很多，在作出决定以前，曾多次提出要慎重考虑。秦力生同志认为：试验站是院设的站，但一定要由一个研究所代管，由于站在北京，应由地理研究所代管。他要求这必须地理所所有负责同志都一致同意。院领导如此慎重，我更兢兢业业，如履薄冰。建议书由十四位有关学部委员签名，是由我将草稿直接送到十三位委员的住所，要求他们经过慎重考虑之后，再根据自己见解，决定是否同意，摒除情面的影响。在此以前，还曾举行多次讨论会，在此以后，又曾向何康同志面陈计划内容，要求他经过考虑之后，再由秘书用电话将意见告诉我。此类试验站在国内缺少成熟的经验，所以还向好些外国科学家请教。他们的答复一般都是坦率、认真的。如荷兰C.J. Stigter博士复信长达27页。他有在发展中国家多年工作的经验，所见比较

切合我国国情。英国J.L.Monteith博士对仪器的选择，就他自己的经验逐项提出意见，还对我所列举的工作内容，按他自己的思路，加以梳理。由于我国人多地少，他特别寄来有关间、套、复种的资料和文献。日本吉野正敏博士告诉我筑波科学城的一些值得注意的教训：最初为了鼓励科学家迁去科学城，建立试验设备的计划很容易得到批准。后来由于经费不足，科学城建设进度放慢了。待有些设备装置完成时，原建议人的工作岗位也已改变，因而后继者的思路，往往与设备不尽谐协，为工作带来不少困难。澳大利亚L.E.Evans博士告诫我：试验内容应针对工作目的慎重选择，提要删繁，而且要有对农场管理有经验的人参与工作，否则即使有优秀的研究人员也未必能取得满意的结果。澳大利亚W.Shepherd博士数度来华，均随带仪器，面授操作方法，两次和我们一起选择场址，并根据在制造中仪器的信息建议改购较便宜、性能又较好的品种。

经过周咨博访，反复考虑以后，又根据华北农业情况和问题，草拟第一期工作任务，经过再三讨论然后定稿。建站以来，工作的同志都很积极，很勤奋。现在由于经济体制改变了，站的附近又成为亚洲运动会的场所，环境条件根本改变了，今后工作如何改弦更张，还需在总结过去的基础上慎重考虑。出版的四本书，除一本系太阳辐射观测资料外，共约130万字，其中有少数是试验工作人员的工作结果，却不是在试验站的工作结果。此外，还有一些在试验站的工作结果接近完成，但尚未脱稿。一部分已在他处发表，未收至此四本之内。两方面相抵销之后，可能稍超过130万字。认真总结，要细针密缕，也非一手一足之力所能完成。

大体地说，试验站的设备、工作项目和内容，在国内带有创先性。工作成果之中有少数发前人所未发，在科学前沿迈出了一步，但需要更多的试验和数据；有一些是有人做过的工作，试验是为了验订其在华北条件下是否也能成立；有一些需要进一步提高。从应用角度来看，应当从已有成果中，将马上可以用的进一步加工后就能用或与其它单位的成果结合起来就能用的分别提出来。有各种各样的应用者，广大的农户、计划机构、水利机构、试验研究机构，要求不尽相同。应当设身处地，将有用成果以适合他们的内容和形式送到他们手上。要对农民有用，特别困难，但决不是没有办法。

不应当否定试验站的工作，但为了下一步，必须重视我们的教训。原来所拟第一期任务没有完成，试验工作几乎全部以冬小麦为对象，只对玉米做了一点点试验。冬小麦的工作成果能不能组织起来成为可以应用于生产的体系。将试验站成果与别人的成果结合起来，集腋成裘的可能性很大，这样做即使不完全成功，也可以知道还差一点什么零部件，便于确定下一步做些什么加以弥补。为了完成第一期任务，还要考虑两年三熟、一年两熟，需要补不少课。

为什么工作会同原定任务距离那么远？主要责任当然应由我负担，一部分应归咎于始料所不及的客观条件。为今后除旧布新，只说主要责任由我负担是无补于事的，必须具体剖析问题如何产生。在前期工作中，做什么，怎么做，我曾慎重地反复考虑，与行政有关的事务，我也一反过去不愿管人管钱管事的积习，不惮繁难，奔走不暇。但自从试验站主任有人担任，我便故态复萌，除了站里把问题端到我面前，不再主动管人管钱管事，关于试验研究，也只以书面提出或在会上讨论，具体安排一般就不再过问了。其实主任的难处很多。建站本来就很繁难。农村体制改变，原来与公社议定的办法不能不随之改变。科研体制与工作人员的思想也日新月异，调整适应，有许多看得见和摸不准的问题。试验站本来是由地理

研究所代管的，应由各所人员参加，在新形势下，事实上变为地理所的站，再变为与所内各研究室脱节的站。“千军万马”的设想成了“孤家寡人”的现实。工作应该是集体工作与个人工作钻研相结合，而新的科学体制却要求每人有成果有论文作为考核的依据。观测资料、仪器保管使用也因此产生不少问题，其中是是非非还很难判定。科学先进的国家有许多试验站，新站建立，可以从老站罗致人才。中国有经验的人很少，也不易调进。所以整个试验站如何组织运转，需要一定时期摸索。唐登银同志在英国进修时，使用气孔计，见其能灵敏地反映土壤-植物水分变化，回来提出购置建议。我虽然知道气孔阻力是一个关键，但认为用此仪器在取样方法上存在不易解决的问题，对我们第一期任务亦非必要，没有采纳他的建议。试验站同志从文献中获悉这一仪器，申请订购（他和试验站都不了解我的意见）。仪器到了开始使用以后我才知道。用此仪器取得了较好的结果。但人力因此分散了，而且进一步探索气孔阻力的前因后果，还要做大量工作。在建站以前，我对数据采集处理系统及仪器技术力量没有给予足够的重视，事先看不见在中国条件下，有些配件很难找到，性能也不够好，整个时间表都被打乱了，为试验站工作带来许多问题，站主任的负担也加重了。站主任面对五花八门的难题，自己又是研究人员，不能不做研究工作，写论文。我只向他们交任务，而不能体会他们执行任务有多大困难。一年两年，大势已定，不易更改，也舍不得更改，航向偏了，自然不能计日呈功，达到预期目的。

以上简单地谈我想到的一些问题。这当然不能代替总结。只有认真地总结，才能完整地提出有用的成果，充分发挥应有的作用，看清楚在前进工作中的暗礁，绕过暗礁。

本书的编辑工作由项月琴和顾钟熊同志担任。书中各文作者除注有星号者（另注说明）外，其余均系中国科学院北京农业生态系统试验站研究人员。

黄秉维

1989.9

# 目 录

|          |           |
|----------|-----------|
| 前言 ..... | 黄秉维 ( 1 ) |
|----------|-----------|

## 第一部分 农田环境辐射

|                                      |                |
|--------------------------------------|----------------|
| 光合有效辐射 (PAR) 的测量 .....               | 周允华 ( 3 )      |
| 中国地区光合有效辐射 (PAR) 能量和光量子通量的时空分布 ..... | 周允华 ( 15 )     |
| 光合有效辐射 (PAR) 研究进展 .....              | 周允华 ( 40 )     |
| 中国地区总辐射时空分布 .....                    | 朱志辉 ( 50 )     |
| 北京地区大气逆辐射瞬时值的经验计算 .....              | 赵文广、周允华 ( 56 ) |
| 北京地区大气逆辐射任意时段总量的经验计算 .....           | 赵文广、周允华 ( 68 ) |

## 第二部分 群丛辐射

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| 植物活动面长波辐射有效温度和视放射率 ..... | 周允华 ( 81 )          |
| 冬小麦群丛几何结构的测量 .....       | 项月琴、周允华、崔景芳 ( 92 )  |
| 冬小麦群丛对总辐射截获的测量 .....     | 项月琴、周允华、崔景芳 ( 104 ) |
| 作物群丛内长波辐射的传输 .....       | 周允华 ( 116 )         |

## 第三部分 作物水分与气孔行为

|                         |                                          |
|-------------------------|------------------------------------------|
| 作物水分亏缺程度的判别方法 .....     | 卢振民 ( 131 )                              |
| 冬小麦田群体水分利用效率的初步研究 ..... | 刘 萱、于沪宁 ( 137 )                          |
| 田间小麦叶片水分状况的变化 .....     | 杨春虹、王 宏、于好勋、穆 红、滕占伟 ( 145 )              |
| 小麦气孔导度的日变化 .....        | .....王 宏、杨春虹、蒋桂玉、章 军、沈丽娜、王何应、徐希德 ( 152 ) |
| 小麦气孔导度的季节变化 .....       | 王 宏 ( 159 )                              |
| 作物水分亏缺敏感度与灌溉决策 .....    | .....王 宏、杨春虹、于洪祥、邹建秋、刘建明 ( 165 )         |
| 作物水分亏缺诊断研究综述 .....      | 王 宏 ( 170 )                              |

## 第四部分 气象条件与作物生长

|                            |             |
|----------------------------|-------------|
| 农田小麦光合生产力模拟与分析 .....       | 杨春虹 ( 193 ) |
| 黄淮海平原农田叶面积指数变化特征 .....     | 董振国 ( 204 ) |
| 小麦叶温和叶面积持续时间对籽粒灌浆的影响 ..... | 刘瑞文 ( 210 ) |
| 真实地表温度与普通地表温度差异分析 .....    | 董振国 ( 219 ) |
| 风速对作物蒸腾速度影响的判别 .....       | 卢振民 ( 225 ) |
| 测定农田蒸发和显热通量的微气象技术 .....    | 谢贤群 ( 230 ) |

## 第五部分 作物土壤环境

- 土地生产潜力研究——以河北省南皮县为例 .....何 平 (247)
- 土壤—植物—大气系统 (SPAC) 水流动态模拟与实验研究——冬小麦根系垂直  
分布 .....卢振民、熊勤学 (256)
- 土壤水分特征曲线和非饱和导水率的数学模型 .....卢振民 (268)
- 非饱和土壤水分运动的数学模型 .....卢振民 (278)
- 麦田土壤溶液养分浓度及时序变化 .....陈世庆、鲁全国、马 翔 (285)

# Experimental Studies on the Environment of Field Crops

## Contents

|               |                     |
|---------------|---------------------|
| Preface ..... | Huang Bingwei ( 1 ) |
|---------------|---------------------|

### Part I Ambient Radiation of Crop Land

|                                                                                                                   |                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Measurements of photosynthetically active radiation .....                                                         | Zhou Yunhua ( 3 )                   |
| Distribution of energy and quantum fluxes of photosynthetically active radiation in China.....                    | Zhou Yunhua ( 15 )                  |
| A review of studies on photosynthetically active radiation.....                                                   | Zhou Yunhua ( 40 )                  |
| Temporal and spatial distribution of solar radiation in China.....                                                | Zhu Zhihui ( 50 )                   |
| An empirical method for estimating instantaneous fluxes of longwave radiation from sky in Beijing .....           | Zhao Wenguan and Zhou Yunhua ( 56 ) |
| An empirical method for estimating fluxes of longwave radiation from sky for various time periods in Beijing..... | Zhao Wenguan and Zhou Yunhua ( 68 ) |

### Part II Radiation in Crop Canopy

|                                                                                               |                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Effective temperature of longwave radiation and apparent emissivity at the top of canopy..... | Zhou Yunhua ( 81 )                                |
| Measurements of geometry of winter wheat canopy.....                                          | Xiang Yueqin, Zhou Yunhua and Cui Jinfang ( 92 )  |
| Measurements of interception of global radiation in winter wheat canopy .....                 | Xiang Yueqin, Zhou Yunhua and Cui Jinfang ( 104 ) |
| Transfer of longwave radiation in plant canopy.....                                           | Zhou Yunhua ( 116 )                               |

### Part III Plant Water Status and Stomatal Behaviour

|                                                                         |                                |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| A new method for diagnosing crop water deficit.....                     | Lu Zhenmin ( 131 )             |
| A preliminary study on the water use efficiency of crop community ..... | Liu Xuan and Yu Huning ( 137 ) |
| Leaf water status of wheat under field condition.....                   |                                |

- Yang Chunhong, Wang Hong, Yu Haoxun, Mo Hong and Teng Zhanwei (145)  
 Diurnal changes of stomatal conductance of wheat .....  
 ..... Wang Hong, Yang Chunhong,  
 Jiang Guiyu, Zhang Jun, Shen Lina, Wang Heying and Xu Xide (152)  
 Seasonal changes of stomatal conductance of wheat..... Wang Hong (159)  
 Crop water stress sensitivity and irrigation scheduling.....  
 ..... Wang Hong,  
 Yang Chunhong, Yu Hongxiang, Zho Jiangiu and Liu Jianming (165)  
 A review on methods of identifying crop water stress..... Wang Hong (170)

#### **Part IV Meteorological Environment and Crop Growth**

- Analysis and modelling of photosynthetic productivity of wheat .....  
 ..... Yang Chunhong (193)  
 The characteristics of leaf area index of crops in the Huang-Huai-Hai  
 Plain..... Dong Zhengguo (204)  
 Influence of canopy temperature and leaf area duration (LAD) on  
 milk filling of winter wheat..... Liu Ruiwen (210)  
 Analysis of the difference between real and apparent ground surface  
 temperature..... Dong Zhengguo (219)  
 Criterion of influence of wind speed on transpiration..... Lu Zhenmin (225)  
 Micrometeorological techniques for determining evapotranspiration and  
 sensible heat flux in the field..... Xie Xianqun (230)

#### **Part V Soil Environment of Crop**

- Studies on the land potential productivity—taking Nanpi County  
 of Hebei Province as an example..... He Ping (247)  
 Field experiment and simulation of water transport in soil-plant  
 -atmosphere continuum—vertical distribution of winter wheat roots  
 ..... Lu Zhenmin and Xong Qinxie (256)  
 A review of models of soil water retention curve and hydraulic conduc-  
 tivity of unsaturated porous media..... Lu Zhenmin (268)  
 A review of mathematical models of water movement in unsaturated  
 soil zone..... Lu Zhenmin (278)  
 Nutrient concentration of soil solution and the characteristics of its  
 daily change in the field .....  
 ..... Chen Shiqing, Lu Quanguo and Ma Xiang (285)

# 第一部分

## 农田环境辐射



# 光合有效辐射(PAR)的测量\*

周允华

## 提 要

利用日本EKO公司生产的MS-800型精密天空分光辐射表于1985年4月—10月在北京测量了太阳散射辐射和总辐射中波长小于700nm的能量所占的比例,分析了它们的日变化规律,研究了太阳高度、云量和大气成份(大气浑浊度系数和地面水汽压)等要素对它们的影响。结果表明:散射辐射的比例值变化明显,平均为65%;总辐射的比例值也受地面水汽压( $E$ )和云量( $N$ )的影响,平均为53%,若扣掉波长小于400nm的紫外辐射(比例值取5%),则总辐射中光合有效辐射(400—700nm)所占比例平均为48%。

## 一、引 言

光合有效辐射(简称PAR)系指能为绿色植物利用来进行光合作用的那部分太阳辐射能,它是形成生物量的基本能源。PAR的测定及其基本特性为气象学、农学和生态学的研究者所重视。对PAR的研究还有助于建筑物理学上对光气候的研究,新近,笔者提出了利用PAR研究光气候的方法<sup>[1]</sup>。

对PAR波段,各研究者取法不一,美国和西欧一般取400—700nm,而苏联和东欧则取380—710nm。根据McCree<sup>[2]</sup>的研究,PAR波段取400—700nm最为合适。

若用 $\eta_Q$ 、 $\eta_s$ 和 $\eta_D$ 分别代表到达地面水平面上的太阳总辐射、直接辐射和散辐射中PAR所占的比例,把它们称作PAR系数,则总辐射中的PAR通量密度 $Q_{PAR}$ 可写成:

$$Q_{PAR} = \eta_s S' + \eta_D D = \eta_Q Q \quad (1)$$

式中 $S'$ 、 $D$ 和 $Q$ 分别为到达地表水平面上的直接辐射、散辐射和总辐射能量通量密度。这样,对PAR的研究就可归结为对三个PAR系数 $\eta_s$ 、 $\eta_D$ 和 $\eta_Q$ 的研究。

60年代开始了对PAR的仪器测量<sup>[3,4]</sup>,70年代以后仪器逐渐完善,不少人对PAR进行了系统的观测<sup>[5-11]</sup>。

项月琴等<sup>[12]</sup>对太阳直接辐射作了细致的分光测量,我们根据这些实测资料提出了计算 $\eta_s$ 的经验公式<sup>[13]</sup>,并在观测中得到了验证<sup>[14]</sup>。在文献<sup>[13]</sup>中,还作了简单的模式计算,分析了 $\eta_D$ 和 $\eta_Q$ 的特性。但是,这些尚不是仪器的观测结果。本文对北京地区主要生长季节(4—10月)的 $\eta_D$ 和 $\eta_Q$ 作了系统测量,从而揭示出有关PAR的许多新特性。

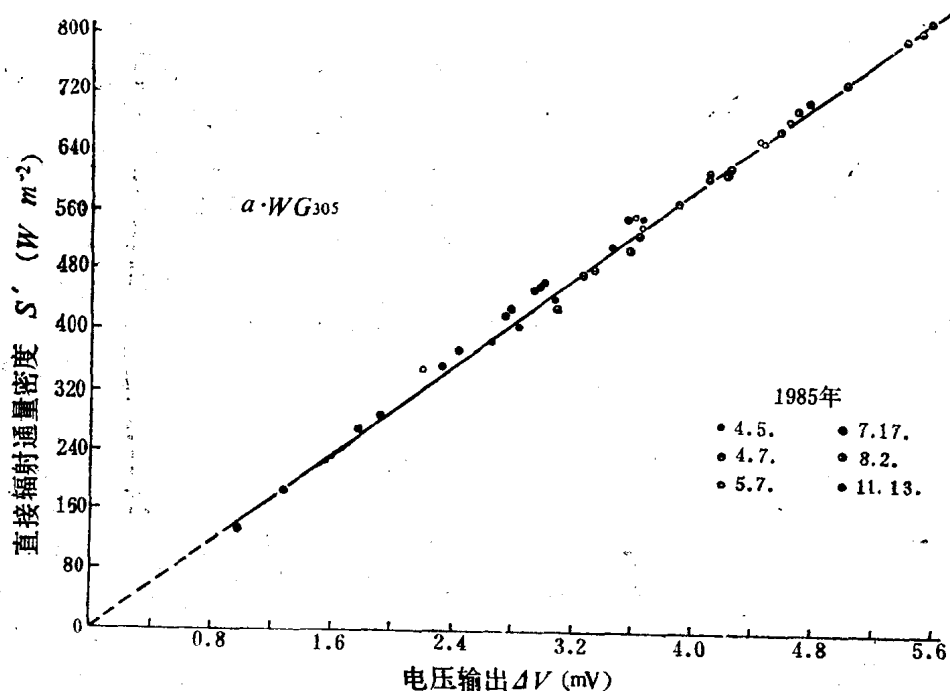
\* 本文为中国科学院地理研究所所长基金“地表能量转化和物质迁移规律研究”资助项目。

## 二、观测方法

### 1. 观测仪器及其标定

观测使用了一台日本EKO公司生产的MS-800型精密天空分光辐射表。辐射表感 应面上罩有两层半球型玻璃罩，内层罩为石英玻璃，外层罩则由可以互换的锐截止型有色玻璃构成，玻璃型号分别为WG<sub>305</sub>、GG<sub>395</sub>和RG<sub>715</sub>。观测前经国家计量科学院测定，其短波起始波长分别为295、384和700nm。其中WG<sub>305</sub>和RG<sub>715</sub>的主带透过率随波长无明显变化，符合气象学规定的质量标准，而GG<sub>395</sub>的主带透过率却随波长的增加迅速减小，至2500nm处，透过率已比最高值降低了0.10，相对差异超过10%，这样的光学特性不能满足气象测量的要求。所以只取用WG<sub>305</sub>和RG<sub>715</sub>两个滤光罩来测定PAR能量。需要指出，用这两个滤光罩测得的分别是全波段的和波长大于700nm的太阳辐射，二者相减所得，不仅包括400—700nm的PAR能量，还包括了波长小于400nm的紫外辐射能量。所以本文所得的 $\eta_D$ 和 $\eta_O$ 值实际上分别是太阳散射辐射和总辐射中波长小于700nm的能量在全波段能量中所占的比例。

标定精密天空分光辐射表所用的标准仪器是一台苏制的萨维诺夫-雅尼舍夫斯基型直接辐射表，仪器常数在观测前由国家气象局标定。当天空分光辐射表用WG<sub>305</sub>半球罩时，就是一台普通的天空辐射表，其仪器常数用常规方法标定。当用RG<sub>715</sub>半球辐射罩时，它就是一台能测量波长大于700nm的天空辐射表，它的仪器常数是用直接辐射表配上国产的HB<sub>11</sub>锐截止型玻璃滤光片进行标定的。HB<sub>11</sub>的透光性能经国家计量科学院测试，起始波长也是700nm。在整个观测过程中，对天空分光辐射表作了多次室外标定（图1）。用WG<sub>305</sub>时，仪器常数是147Wm<sup>-2</sup>/mV；用RG<sub>715</sub>时，是143Wm<sup>-2</sup>/mV。



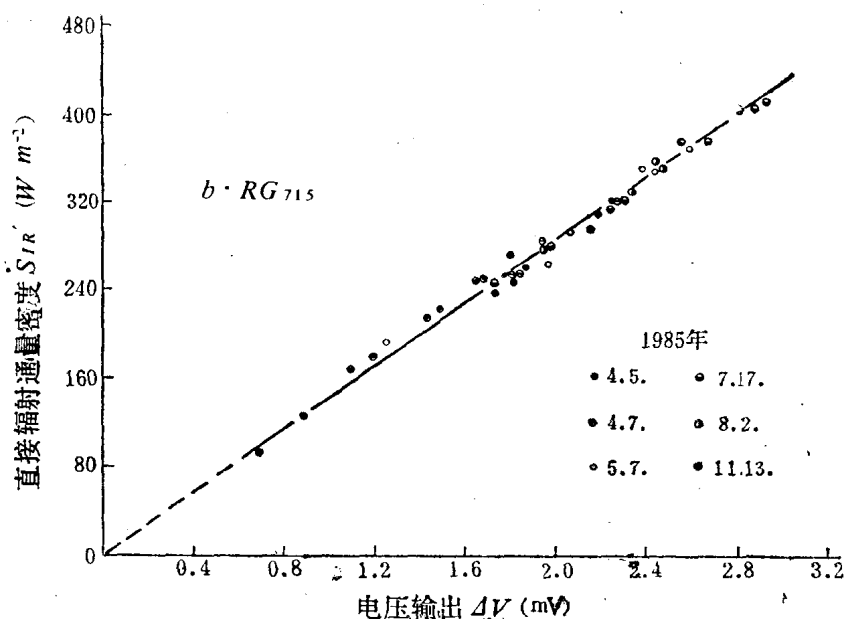


图 1 EKO精密天空分光辐射表的标定

横坐标 $\Delta V$ 为加挡光板前后仪器电压输出值之差, 纵坐标 $S'$ 和 $S'_{IR}$ 分别为水平面上全波段的和波长大于700nm的直接辐射通量密度。直线斜率就是仪器常数。(a. 用WG<sub>305</sub>, b. 用RG<sub>715</sub>)

Fig.1 Calibration of EKO precision spectral pronometer.

Abscissa  $\Delta V$  is difference between the outputs (voltage) of recorder without and with shade plat. Ordinates  $S'$  and  $S'_{IR}$  are the flux densities of solar direct radiation in the whole short wave band and in the wave band of  $\lambda > 700\text{nm}$ , respectively (a. with filter WG<sub>305</sub>, b. with filter RG<sub>715</sub>)

## 2. 观测时间和方法

为了测定北京地区生长季节PAR的基本特性, 观测从1985年4月1日到10月31日, 长达7个月。采用了遮光板, 故可测得总辐射和散射辐射。观测顺序是: WG<sub>305</sub>→WG<sub>305</sub> (遮光) →RG<sub>715</sub>→RG<sub>715</sub> (遮光) →RG<sub>715</sub>→WG<sub>305</sub>→(遮光)→WG<sub>305</sub>。每次观测取两次结果的平均。若观测时日月有云, 辐射不稳定, 两次读数值差异较大, 则剔除不用。每天从8时至18时正点观测, 4和5月每小时观测一次, 6月份后每两小时观测一次。电压输出值采用英国Fluke公司生产的8050型数字万用表记录, 其中毫伏档在观测前经国家计量科学院检定。观测中万用表一直置于遮阴通风木箱内, 以防仪器辐射增温引起测量误差。

## 三、观测结果

### 1. PAR系数的日变化

统计了4—10月各月的 $\eta_D$ 和 $\eta_Q$ 定时平均值和标准差, 列于表1。

表1表明, 散射辐射的PAR系数 $\eta_D$ 有比较明显的日变化, 中午高, 早晚低, 上午略高于

表 1  $\eta_D$ 和 $\eta_Q$ 的定时月平均值和标准差Tab. 1 Monthly mean and standard deviation of  $\eta_D$  and  $\eta_Q$  at specified times

| 时<br>月<br>份 | $\eta_D(\%)$ |       |       |       |       |       |             | $\eta_Q(\%)$ |      |      |      |      |      |             |
|-------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|
|             | 8            | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 月<br>平<br>均 | 8            | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 月<br>平<br>均 |
| 4           | 59±7         | 66±7  | 65±7  | 61±8  | 58±6  | 58±7  | 61          | 47±3         | 51±3 | 50±1 | 51±3 | 50±3 | 48±3 | 50          |
| 5           | 65±11        | 63±7  | 62±7  | 63±8  | 64±8  | 62±10 | 63          | 54±3         | 54±5 | 53±5 | 54±5 | 54±4 | 53±3 | 54          |
| 6           | 64±5         | 67±6  | 69±8  | 68±5  | 69±6  | 64±8  | 67          | 53±4         | 53±3 | 53±3 | 53±4 | 55±4 | 54±6 | 53          |
| 7           | 63±11        | 67±10 | 66±8  | 63±8  | 65±8  | 63±5  | 65          | 56±6         | 56±4 | 55±3 | 56±6 | 56±4 | 56±5 | 56          |
| 8           | 69±10        | 71±9  | 65±11 | 66±8  | 67±7  | 61±4  | 67          | 55±5         | 56±4 | 55±3 | 57±5 | 55±6 | 55±5 | 55          |
| 9           | 61±12        | 69±13 | 69±12 | 67±10 | 67±10 | 68±17 | 68          | 52±4         | 52±4 | 54±3 | 53±5 | 54±6 | 53±5 | 53          |
| 10          | 61±10        | 63±10 | 67±11 | 64±9  | 61±9  | 59±8  | 63          | 49±4         | 51±3 | 52±3 | 52±5 | 51±4 | 52±5 | 51          |

下午。 $\eta_D$ 的标准差很大,反映了 $\eta_D$ 值很不稳定,受大气状况的影响很大。而总辐射的PAR系数 $\eta_Q$ 几乎没有明显日变化,标准差也较小,表明 $\eta_Q$ 值比较稳定,受大气状况的影响比 $\eta_D$ 要小。

$\eta_D$ 和 $\eta_Q$ 各月平均值不同, $\eta_D$ 为61—68%,4—10月平均为65%; $\eta_Q$ 为50—56%,平均为53%。

## 2. 太阳高度和云对PAR系数的影响

把全部观测资料按太阳高度分组统计,从而得到平均天气状况下的 $\eta_D$ 、 $\eta_Q$ 随太阳高度 $h$ 的变化。为了研究云的影响,同时统计了晴朗天气(云量 $\leq 2$ 成)的和阴天的PAR系数。晴天的记作 $\eta_{D0}$ 和 $\eta_{Q0}$ 。阴天时, $\eta_D = \eta_Q$ ,记作 $\eta_n$ 。全部结果示于表2和图2。

可以看到:散射辐射的PAR系数随太阳高度的降低而减小,云的存在能使它大幅度下降,在 $h > 10^\circ$ 时,平均而言, $\eta_n \approx 0.82\eta_{D0}$ 。总辐射的PAR系数几乎不受太阳高度的影响,但

表 2 PAR系数的平均值和标准差随太阳高度 $h$ 的变化Tab. 2 Mean values and standard deviation of  $\eta_{D0}$ ,  $\eta_D$ ,  $\eta_{Q0}$ ,  $\eta_Q$ , and  $\eta_n$  changed with solar elevation  $h$ , respectively

| $h$         | $\eta_{D0}(\%)$ | $\eta_D(\%)$ | $\eta_{Q0}(\%)$ | $\eta_Q(\%)$ | $\eta_n(\%)$ |
|-------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|
| $>70^\circ$ | 70±6            | 67±9         | 51±2            | 54±5         | 55±3         |
| 60—70°      | 69±6            | 65±8         | 51±3            | 54±7         | 58±5         |
| 50—60°      | 69±8            | 66±9         | 51±3            | 54±5         | 56±5         |
| 40—50°      | 71±10           | 66±11        | 51±2            | 53±5         | 56±6         |
| 30—40°      | 68±9            | 64±9         | 51±2            | 53±5         | 55±5         |
| 20—30°      | 66±9            | 62±9         | 51±4            | 52±6         | 55±4         |
| 10—20°      | 64±10           | 61±10        | 51±7            | 52±7         | 55±6         |
| $<10^\circ$ | 65±10           | 61±12        | 56±13           | 52±13        | 51±8         |

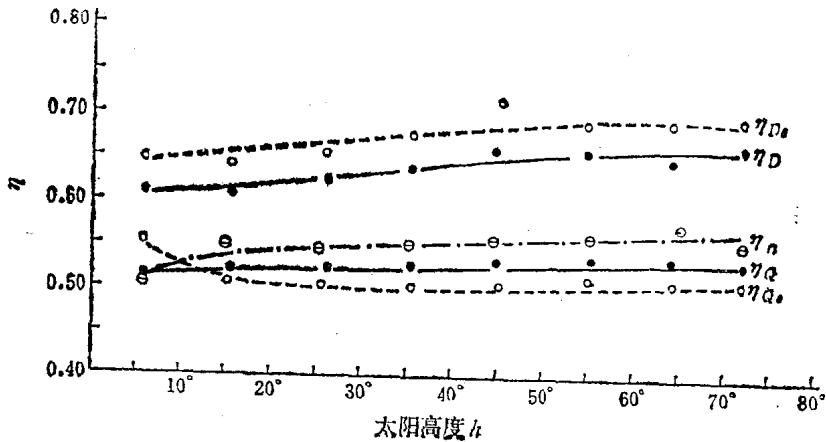


图 2 PAR系数随太阳高度 $h$ 的变化

Fig. 2 Values of  $\eta_{D0}$ ,  $\eta_D$ ,  $\eta_{Q0}$ ,  $\eta_Q$  and  $\eta_\pi$  changed with solar elevation  $h$ , respectively

云能它使的数值增大, 在 $h > 10^\circ$ 时, 平均而言,  $\eta_\pi \approx 1.09\eta_{Q0}$ 。在 $h < 10^\circ$ 的情况下, 由于观测误差很大, 数值已不可信。

### 3. 大气成份对PAR系数的影响

天空晴朗时, 太阳辐射穿过大气要受到三种减弱: (1) 空气分子的散射; (2) 气溶胶粒子的散射和吸收; (3) 某些气体的选择吸收 (在紫外和可见波段主要是 $O_3$ , 在红外波段主要是水汽)。在大气中, 变化最大并对太阳辐射分光能量影响最大的是水汽和气溶胶两种成分。笔者的研究表明<sup>[15]</sup>: 可用地面水汽压 $E$ 来表征测点上空的水汽含量。至于垂直气柱内气溶胶粒子的多寡则可用Ångström大气浑浊度系数 $\beta$ 来表征。在进行PAR观测的同时, 用苏制直接辐射表配上国产HB<sub>11</sub>滤光片进行 $\beta$ 的观测。有关 $\beta$ 的概念和观测方法参见文献[16]。

为了研究水汽和气溶胶对PAR系数的影响, 取用了晴朗少云天气 (云量 $\leq 2$ 成) 并且太阳高度大于 $30^\circ$ 时的全部观测结果。把它们按地面水汽压和大气浑浊度 分组 平均, 结果绘于图3和图4。

图3表明:  $\eta_{D0}$ 随大气浑浊度系数 $\beta$ 的增高而减小, 随地面水汽压 $E$ 的增高而增大。也就是说, 空气中气溶胶含量越多 (大气越浑浊), 或空气越干燥, 则散射辐射中波长小于700nm的辐射所占比例就越小, 红外辐射所占比例就越大。大气成份对太阳散射光谱结构的上述影响是很好理解的: 散射辐射由空气分子的散射和气溶胶的散射两部分组成。前者与波长4次方成反比, 后者平均而言只与波长的1.3次方成反比。因此, 当空气很洁净时, 散射辐射中来自空气分子散射的比重增加, 短波成分丰富, 故 $\eta_{D0}$ 较大; 反之, 气溶胶含量增加时, 短波成分相对减少, 故 $\eta_{D0}$ 减少。这也符合人们的经验: 大气洁净时天空呈蓝色, 天空浑浊时, 由蓝色转成灰白色。至于 $\eta_{Q0}$ 随空气湿度的降低而减小的现象则是由于水汽对红外辐射的选择吸收造成的, 水汽少时, 它对红外散射辐射的吸收也少, 所以相对而言, 散射辐射中红外成分增加, 短波成分所占比例就降低了。

图4表明:  $\eta_{Q0}$ 随大气浑浊度的增高只略有减小, 但随地面水汽压的增高却明显增大。这是因为直接辐射中被散射掉的能量又有相当一部分转化成天空散射辐射到达地面, 所以气溶胶粒子的多寡对总辐射中的短波成分无明显影响。可是水汽对红外辐射的吸收不管是对直