



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

气象学实习指导

南 方 本

包云轩 樊多琦 主编

非气象专业用

6-43
223
002
C3

中 国 农 业 出 版 社

面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

气象学实习指导

南方本

包云轩 樊多琦 主编

非气象专业用

中国农业出版社

前 言

《气象学实习指导》是高等教育“面向 21 世纪课程教材”《气象学》（南方本）的配套实习教材。全书共分四个部分：第一部分是气象要素的观测，包括实习一、日射观测，实习二、温度观测，实习三、大气中的水分观测，实习四、气压和风的观测，实习五、云、能见度和天气现象的观测；第二部分是实习六、农业小气候观测；第三部分是实习七、天气分析；第四部分是气象资料的获取、统计、分析与应用，包括实习八、等值线区域气候图的绘制与分析，实习九、农业气候资料的分析与应用，实习十、气象资料的获取、分析与应用。其中第一、二部分详细介绍了各种常规气象仪器的感应原理、构造、性能、安装和使用方法，系统阐述了大、小气候观测的程序、方法和步骤；第三、四部分着重讨论各种天气、气候资料的获取、整理、统计、制图、分析和应用。这四个部分的实习内容不仅与理论教材相衔接，而且前后呼应，具有一定的科学性和先进性，能较好地适应生产实际，适应各行各业的需要。我们对每个实习都配置了实习作业并编制了相应的实习报告，要求学生在实习时能够认真操作并独立完成实习报告，以期达到对气象学基本理论和基本实践技能的掌握。

该实习指导内容丰富，实用性强，实际教学中可根据课程学时数和各院校具体条件作相应取舍。实习安排一般分为室外观测和室内绘图分析两大块，某些实习内容也可集中在数天集中完成。教学时应遵循理论与实践相结合的原则，在教师辅导与示范的前提下，使每个学生都动手操作，独立完成规定的实习内容。

《气象学实习指导》是我国南方 12 所高等农林院校全体气象教师共同努力的结晶。全书由包云轩、樊多琦主编，周平、

李有、杨建松等参编。由于我们水平有限，加之时间仓促，因此在内容取舍和安排方面难免存在谬误之处，希望能得到使用本教材的师生及有关专家的批评指正。

编 者

2001年12月

目 录

实习一	日射观测	1
实习二	温度观测	12
实习三	大气中的水分观测	22
实习四	气压和风的观测.....	34
实习五	云、能见度和天气现象的观测.....	45
实习六	农业小气候观测.....	57
实习七	天气分析	69
实习八	等值线区域气候图的绘制与分析	75
实习九	农业气候资料的分析与应用	83
实习十	气象资料的获取、分析和应用.....	96
附表-1	观测项目的记录单位和记录要求	103
附表-2	日照时数表 (h)	104
附表-3	水面上饱和水汽压 (hPa)	107
附表-4	空气相对湿度 (%) 查算表 (百叶箱)	108
附表-5	空气相对湿度 (%) 查算表 (通风干湿表)	114
附表-6	日期序列表.....	120

实习一

日射观测

【实习目的】

通过本实习了解测定辐射强度、光照度和日照时数的仪器及其测量原理，掌握测定辐射强度、光照度和日照时数的方法。

【实习仪器】

总辐射表、直接辐射表、散射辐射表、净辐射表、照度计、日照计等。

【实习内容】

一、气象观测场简述

观测场是获取地面气象资料的主要场所，应设在能较好地反映本地较大范围气象要素特点的地方，避免受局部地形的影响。观测场四周必须空旷平坦，避免设在陡坡、洼地或邻近有丛林、铁路、公路、工矿、烟囱、高大建筑物的地方。在城市或工矿区，观测场应选择在城市或工矿区最多风向的上风方向。观测场边缘与四周孤立障碍物的距离，至少是该障碍物高度的 3 倍以上；距离成排的障碍物，至少是该障碍物高度的 10 倍以上；距离较大水体（水库、湖泊、河流、海洋等）的最高水位线，水平距离至少在 100m 以上。观测场四周 10m 范围内不能种植高秆作物，以保证气流畅通。

观测场大小应为 $25 \times 25\text{m}^2$ 。场地平整并保持有均匀草层，草高不能超过 20cm。场内铺设 30~50cm 宽的小路，为保护场地自然状态，只准在小路上行走。场内不准种植作物。观测场四周设高度 1.2m 的铁围栏，以保护仪器设备。

观测场内应保持整洁，经常清除树叶、纸屑等杂物。有积雪时，除小路上的积雪可以清除外，应保护场地积雪的自然状态。

场内仪器的布置，要互不影响并便于观测操作，如图 1-1。仪器布置的具体要求是：高的仪器安置在北面，低的仪器安置在南面，东西成行，南北交

错。仪器间的南北间距不小于 3m，东西间距不小于 4m，仪器距围栏不小于 3m。观测场门最好开在北面。仪器安置在紧靠东西向小路的南面，观测人员应从北面接近仪器。

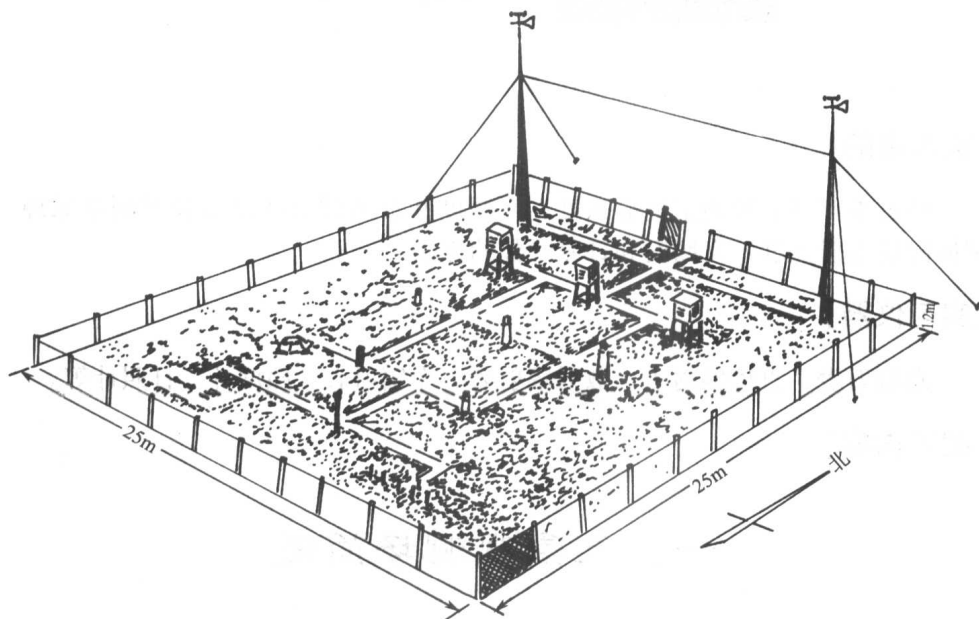


图 1-1 气象观测场简图

二、辐射强度的观测

测量辐射强度的仪器统称为辐射表。辐射表根据热电效应原理制成，感应元件由感应面和热电堆组成，感应面上涂有高吸收率的黑色涂层，绕线型电镀式多接点热电堆采用康铜或锰铜镀层，热接点在感应面上，冷接点通常位于机体内。当感应面接收到辐射能时，温度升高，热电堆冷热接点间产生温差，形成电位差（或称电动势），电位差的存在产生了电流，电流大小与接收到的辐射强度成正比。辐射表广泛用于气象、农业、环境、生态、太阳能利用、建筑等专业。

（一）辐射仪器的安装

总辐射表、直射辐射表、散射辐射表、反射辐射表和净辐射表，应安装在

符合条件的场地，并避开有地方性雾、烟尘等大气污染严重的地方。测量来自天空的各种辐射时，要求仪器上方不能有任何障碍物影响；测量来自地面的各种辐射时，要求有一个空旷、无障碍物、有代表性下垫面的地方。

地面气象观测场符合辐射观测条件的，可在场地南边扩出 $10\text{m} \times 25\text{m}$ （南北 10m ，东西 25m ）场地或另辟符合要求的 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 场地作为辐射观测场，四周架设围栏，仪器安装在观测场地的中部。场内浅草平铺，草高不超过 20cm ，并铺以小路，冬季积雪时不要破坏雪面自然状态。

若无法开辟专用观测场地，也可在地面观测场内南边的空旷处，安装辐射仪器。如果地面气象观测场不符合辐射观测条件的，可将总辐射表、直接辐射表、散射辐射表安置在天空条件符合要求的楼顶平台上，而将反射辐射表和净辐射表安置在符合条件、有代表性下垫面的地方。

辐射仪器应安装在特制的台架上，台架采用牢固的不易变形的材料，如木材或金属，通常漆成灰色或黑色。全部仪器可安装在一个或几个台架上，离地面高度为 1.5m ，辐射表排列的原则是：各仪器间应间隔一定距离，一般高的仪器安装在北面，低的在南边，各辐射表互不影响，台架上辐射表的安装位置参照图 1-2。辐射表的输出端用专用防水屏蔽电缆线与仪器显示记录部分连接。

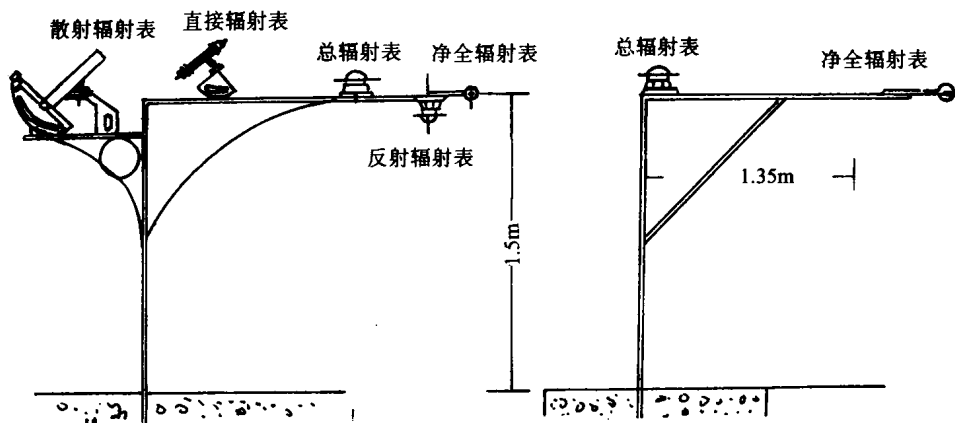


图 1-2 辐射表安装图

（二）总辐射表

总辐射表又称天空辐射表、反射辐射表，用于测量总辐射和反射辐射。水平面上， 2π 立体角内所接收到的太阳直接辐射和散射辐射之和称为总

辐射。测量总辐射时总辐射表感应面应向上水平安装。

反射辐射是指投射的总辐射被地表面所反射及仪器与地面之间的大气所散射的太阳辐射。测量反射辐射时总辐射表感应面应向下水平安装。

1. TBQ-2 总辐射表 TBQ-2 总辐射表见图 1-3, 由感应元件、玻璃罩和附件组成。

感应元件由感应面和热电堆组成, 感应面为圆形, 表面为高吸收率的黑色涂层, 热电堆为绕线型电镀式多接点热电堆, 并配有温度补偿电路。玻璃罩为半球形双层石英玻璃罩, 经精密的光学冷加工磨制而成, 用于防止外界环境对感应元件性能的影响, 以减少测量误差。附件包括机体、干燥器、白色挡板、底座、水准器、接线柱和保护罩等。

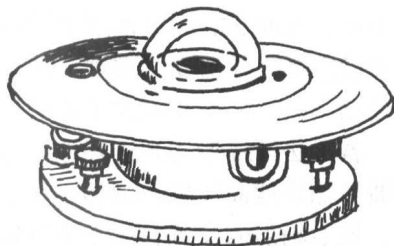


图 1-3 TBQ-2 总辐射表

TBQ-2 总辐射表的测量光谱范围为 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的太阳短波辐射, 灵敏度为 $7 \sim 14 \mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$, 响应时间 $\leq 30\text{s}$ 。

总辐射表安装时要使感应面处于水平状态, 并将接线柱导线与辐射记录仪连接起来。调整水平的方法是调整底座上三个水平调整螺旋, 使水准器气泡位于中央。测量总辐射的总辐射表安装时感应面向上。测量反射辐射的总辐射表安装时感应面向下, 并将白色挡板翻过来装, 以避免雨水积聚。

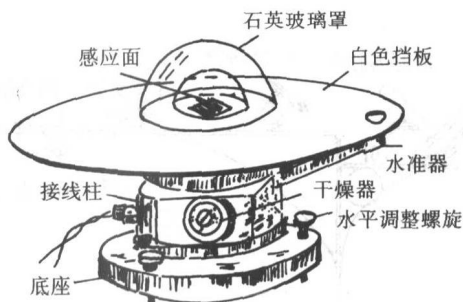


图 1-4 DFY-4 总辐射表

2. DFY-4 总辐射表 DFY-4 总辐射表见图 1-4, 其构造原理、技术指标、安装使用方法与 TBQ-2 总辐射表基本相同, 但外形轮廓稍大, 感应面为方形。

(三) 直接辐射表

直接辐射表又称日射表, 用于测量太阳直接辐射。

直接来自日盘的太阳辐射称为太阳直接辐射。实际测量的太阳直接辐射包含从太阳中心外延大约 2.5° 半角内的太阳直接辐射和狭窄的环形天空的散射

辐射（环日辐射）。

1. DFY-3 直接辐射表

DFY-3 直接辐射表见图 1-5，由进光筒、感应元件、跟踪架（赤道架）和附件组成。

进光筒是一个金属圆筒，筒内有多层黑色的环形光栏，筒口半开敞角约为 $3^{\circ}21'$ ，筒口装有石英玻璃片。进光筒前有一金属箍用来安放各种滤光片。进光筒两端分别固定有两个小圆环，筒口圆环上有一小孔，筒末端圆环白色盘有一黑点，小孔和黑点的连线与筒中轴线相平行，如果光线透过小孔后光点落在黑点上，说明进光筒已对准太阳。

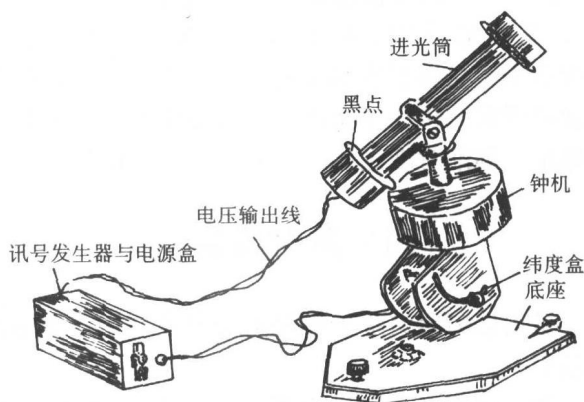


图 1-5 DFY-3 直接辐射表

感应元件由感应面和热电堆组成。感应面涂有高吸收率的黑色涂层，热电堆为绕线型电镀式多接点热电堆。

跟踪架是支撑进光筒并使之自动跟踪太阳的一种装置，由钟机、讯号发生器和电源等组成。

DFY-3 直接辐射表的测量光谱范围为 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的太阳短波辐射，灵敏度为 $7 \sim 14 \mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$ ，响应时间 $\leq 35\text{s}$ ，跟踪精度为 $24\text{h} < \pm 1^{\circ}$ 。

直接辐射表安装时要使底座上的方位线对准南北线，底板处于水平状态，纬度刻度盘对准当地纬度，并将接线柱导线与辐射记录仪连接起来。测定南北线的方法主要有经纬仪法和铅垂线法等。经纬仪法是在真太阳时的正午，用经纬仪观测太阳，然后降低物镜到水平面一点，此点与观测点的连线，即为南北线，在晴朗的夜晚用经纬仪观测北极星也可确定出南北线。铅垂线法是在真太阳时的正午，使用铅垂线，铅垂线的投影即为南北线。使底板水平的方法是转动底板上的水平调整螺旋，使水准器气泡位于中央。使纬度刻度盘对准当地纬度的方法是松开纬度刻度盘上的螺旋，转动刻度盘使之对准当地纬度，然后转紧螺旋。

DFY-3 直接辐射表没有微动螺旋，转动进光筒对准太阳时，应先松开进光筒固定螺旋，对准光点后，再拧紧固定螺旋。跟踪观测一段时间后，若发现导线绕住时应及时放松，方法是在夜间或不观测时松开进光筒固定螺旋，向相

反方向旋转进光筒直至导线完全放松,再拧紧固定螺旋。

2. TBS-2 直接辐射表 TBS-2 直接辐射表见图 1-6,其构造原理、技术指标、安装使用方法与 DFY-3 型直接辐射表基本相同。TBS-2 直接辐射表有微调螺旋,转动进光筒时必须使用方位、仰角微调螺旋,逐渐对准光点,使进光筒对准太阳。

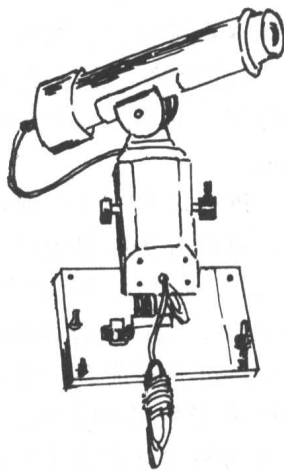


图 1-6 TBS-2 直接辐射表

(四) 散射辐射表

散射辐射表又称天光漫射辐射表,用于测量散射辐射。

散射辐射是指被大气散射和反射,而从 2π 球面度的立体角投射到仪器水平感应面上的太阳辐射,又称天光漫射。实际测量散射辐射时将总辐射表中的太阳直接辐射遮蔽后即测得散射辐射,散射辐射表通常由总辐射表配上遮蔽太阳直接辐射的遮光装置(遮光环、遮光球或遮光板)构成。

1. DFP-1 散射装置 DFP-1 散射装置见图 1-7,由总辐射表和 DFP-1 遮光装置两部分组成。

遮光装置由遮光环、标尺、丝杆调整螺旋、支架、底板等组成,总辐射表安装在支架平台上。遮光环的宽度为 65mm,直径为 400mm,固定在标尺的丝杆调整螺旋上,其作用是保证从日出到日落能够连续遮蔽太阳直接辐射。标尺上刻有纬度刻度与赤纬刻度,标尺与支架固定在底板上。

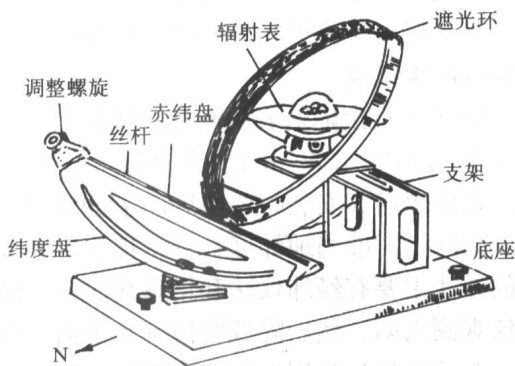


图 1-7 DFP-1 散射装置

散射辐射表安装时,使标尺指向正南北方向(遮光环丝杆调整螺旋柄朝北),转动底板上的水平调整螺旋使底板水平,按当地地理纬度固定标尺位置,将总辐射表安装在支架平台上并调整水平,按当日的太阳赤纬调整遮光环使之恰好全部遮住总辐射表的感应面和玻璃罩,并将接线柱导线与辐射记录仪连接起来。

2. TBD-1 散射装置 TBD-1 散射装置见图 1-8, 由总辐射表和 TBD-1 遮光装置两部分组成。遮光装置采用遮光球, 由电动机带动自动跟踪太阳以遮蔽太阳直接辐射。

此外, 还有采用手动遮光板的散射装置。

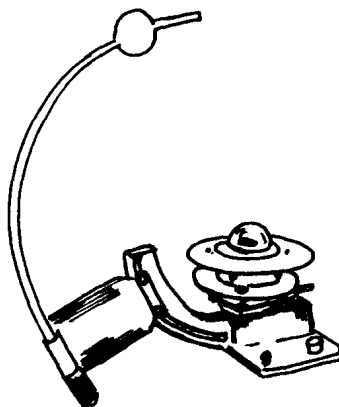


图 1-8 TBD-1 散射装置

(五) 净辐射表

净辐射表又称净全辐射表, 用于测量净辐射。

由天空 (包括太阳和大气) 向下投射的和由地表 (包括土壤、植物、水面) 向上投射的全波段辐射量之差称为地面辐射差额, 又称净全辐射, 简称净辐射。净辐射是研究地表热量收支状况的主要资料。

1. DFY-5 净辐射表 DFY-5 净辐射表见图 1-9, 由感应元件、薄膜罩和附件组成。

感应元件由上下两个感应面和热电堆组成, 感应面为方形, 能吸收波长为 $0.3 \sim 100\mu\text{m}$ 全波段辐射, 热电堆两端分别与上下两个感应面相接。由于上下感应面接收到的辐射强度不同, 使得热电堆两端产生温度差, 其输出的温差电动势与上下感应面接收的辐射强度的差值成正比。

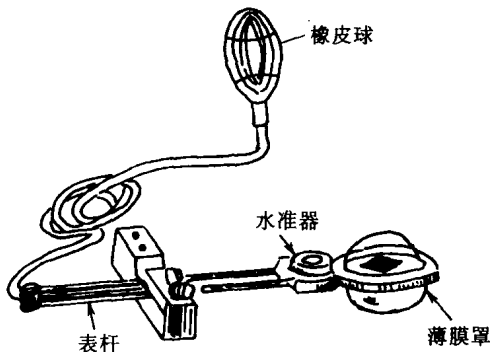


图 1-9 DFY-5 净辐射表

为防止风的影响和保护感应面, 上下感应面均装有聚乙烯薄膜罩。薄膜罩为半球形, 边缘用橡皮密封圈、压圈密封固定。

附件主要有表杆、干燥器、上下水准器、上下金属盖、橡皮球等。干燥器装在表杆内, 内装硅胶, 橡皮球用于充气, 使上下薄膜罩充成半球形。

DFY-5 净辐射表的测量光谱范围为 $0.3 \sim 100\mu\text{m}$ 的全波段辐射, 有长波与全波段两个灵敏度, 均在 $7 \sim 14\mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$, 响应时间 $\leq 60\text{s}$ 。白天 (净辐射为正值) 采用全波段灵敏度, 夜间 (净辐射为负值) 采用长波灵敏度。

净辐射表安装时应将感应面调整水平,并将导线与辐射记录仪连接起来。

2. TBB-1 净辐射表 TBB-1 净辐射表见图 1-10,其构造原理、技术指标、安装使用方法与 DFY-5 净全辐射表基本相同。但外形轮廓稍大,感应面为圆形,测量光谱范围为 $0.27 \sim 3\mu\text{m}$ 的短波辐射和 $3 \sim 50\mu\text{m}$ 的长波辐射。

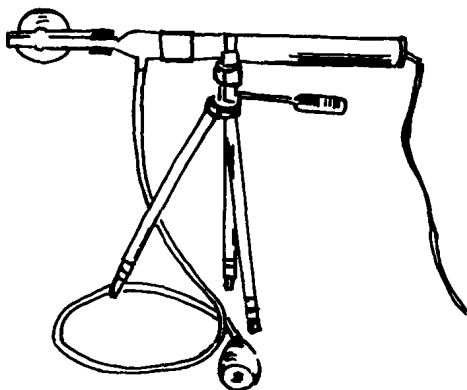


图 1-10 TBB-1 净辐射表

(六) 管型辐射表

管型辐射表又称管状辐射表,用于测量植物群落中的太阳辐射强度。

TBQ-3 管型辐射表见图 1-11,安装时应将感应面调整水平,并将导线与辐射记录仪连接起来。

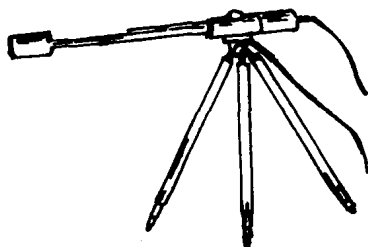


图 1-11 TBQ-3 管型辐射表

分光光谱辐射表用于测量太阳总辐射和红外、可见、紫外光谱辐射强度。

TBQ-4-1 分光光谱辐射表见图 1-12,其构造原理、安装使用方法与 TBQ-2 总辐射表基本相同。双层玻璃罩的内罩为石英玻璃,外罩为光学玻璃,主要有 WB280、JB400、HB700 玻璃罩。

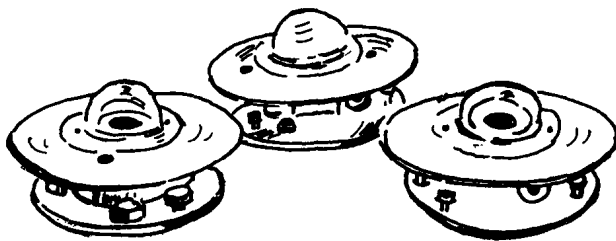


图 1-12 TBQ-4-1 分光光谱辐射表

带 WB280 玻璃罩的辐射表可测量太阳总辐射强度;带 WB280 玻璃罩的辐射表和带 JB400 玻璃罩的辐射表配合,可测量太阳红外辐射强度;带 JB400 玻璃罩的辐射表和带 HB700 玻璃罩的辐射表配合,可测量太阳紫外辐射强度。

(八) 辐射记录仪

辐射记录仪在辐射测量时与辐射表连接,是辐射观测专用数据采集系统。可自动记录辐射强度的瞬时值、小时累值、日累值、日最大值等。

JY4795 智能日射记录仪是一种用微处理机控制的五通道数字式辐射记录仪,可同时接不同类型的 5 个辐射表,机内自带微型打印机。

DRB-C 日射记录仪是一种用单片机控制的单通道数字式辐射记录仪,可接不同类型的辐射表。

RYJ-2 和 RYJ-4 全自动辐射记录仪是用 PC 型微机控制的多通道数字式辐射记录仪,可同时接 5 个或 5 个以上不同类型的辐射表,主机可对数据进行处理并储存两天的连续观测资料,数据也可通过屏幕调阅或打印在纸带上。

三、光照度的观测

照度计是测量光照度(简称照度)的仪器,根据光电效应的原理制成。感光元件为光敏半导体(光电池),通常采用硅(或硒)光电池。当光线投射到光电池上时,光电池将光能转化为电能,反映在电流表上,电流强度与光照度成正比。

照度计有指针式和数字式两种,均由感光元件和电流表两部分组成,如图 1-13。电流表直接显示出光照强度读数,单位为勒克斯(Lx 或 Lux)。

测量光照度时将光电池的插头插入电流表输入插口,光电池置于被测点,将电流表上的电源开关拨向“开”位置,打开光电池遮光罩,选择相应的量程开关,由电流表读出被测点的光照度读数。

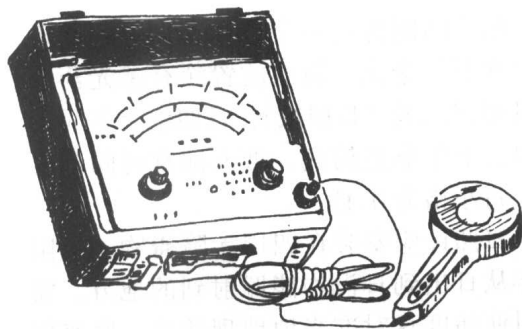


图 1-13 照度计

使用照度计时应注意防止光电池的老化,不要让光电池长时间暴露在光线(尤其是强光)下,测量时一般在强光下暴露时间不超过 30s,弱光下不超过

60s, 不测量时应盖上遮光罩; 使用指针式照度计时应防止电流过大损坏电流表, 测量时量程选择应从高量程开始, 如电流表指针偏转不显著, 再顺次选择降低量程; 要注意保持感应面的干洁; 测量时, 感应面朝向可选择向上或与太阳直射光线垂直。

另外, 还有一种相对照度表, 用来测定作物群体内的相对照度。相对照度是群体内光照度与外界自然光照度的百分比。

相对照度表配有两个感光探头, 一个置于植株外自然光照下称为强光探头, 另一个置于植株间弱光照下称为弱光探头, 两个探头为电桥的两个桥臂, 应用平衡电桥的原理, 可测得株间光和自然光两个照度值的比例, 即农田中的相对光强。

四、日照时数的观测

太阳从一地的东方地平线跃出到落入西方地平线以下所经历的时间, 称为日照时间。太阳在一地实际直射地面的时数, 称为日照时数或实照时数。

测定日照时数的仪器称为日照计, 有暗筒式(乔唐式)日照计和聚焦式(康培司托克式)日照计两种。常用的是暗筒式(乔唐式)日照计, 利用感光显影原理, 根据感光迹线长短来测定日照时数。

暗筒式日照计由记录用的暗筒、调节筒轴倾角的支架和固定方位的底座组成, 如图 1-14。

暗筒两侧各有一个进光孔, 分别用于上午和下午进光。筒内放置涂有感光药液的日照记录纸(日照纸), 日照纸上午靠近筒口, 下午靠近筒底, 纸上标有时间刻度线, 每小格为 0.1h。

日照计应安装在四周无障碍物, 太阳终年从日出到日没均能照射到的地方。安装时使纬度盘对准当地地理纬度, 底座保持水平, 筒口朝北, 筒轴对准南北线。

日照计每天换纸一次, 在日落后进行。换纸(纸上涂上感光 and 显影混合液)时使日照纸上 10 时线对准暗筒口的标记刻线, 用叉形金属压条压住日照纸并盖上日照计筒盖, 再检查一下进光孔, 看看有无杂物堵塞, 如有则用细针将其剔

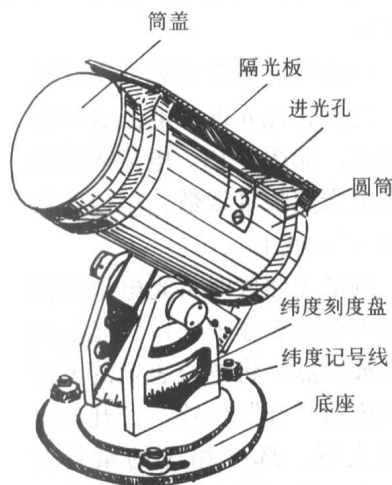


图 1-14 暗筒式日照计

除。将换下的日照纸，立即在感光迹线下描画出等长的铅笔线，然后用清水漂洗4~5min，阴干后将感光迹线与铅笔线相比较，若感光迹线长于铅笔线，则延长铅笔线，使之与感光迹线等长，若铅笔线长于感光迹线，则仍以铅笔线为准。最后根据铅笔线的长度计算出当天的日照时数，精确到0.1h。

感光药液是将感光药剂——柠檬酸铁铵〔 $\text{Fe}_2(\text{NH}_4)_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_3$ 〕与水按照3:10的比例配制成溶液后用褐色瓶装好放置在暗处，将显影药剂——赤血盐〔 $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 〕与水按1:10的比例配成溶液用瓶装好也放置在暗处。使用时，在暗处取等量溶液混合后，用棉花均匀地涂在日照纸上。

一年中，感光迹线有时偏上，有时偏下，这是由于太阳直射点在一年中南北移动所造成的。夏半年（春分~秋分）时，北半球太阳偏北，感光迹线偏下，呈凹形；冬半年（秋分~春分）时，北半球太阳偏南，感光迹线偏上，呈凸形；在春分和秋分时，太阳直射赤道，感光迹线为直线。

日照时数与可照时间之比的百分数，称为日照百分率，即：

$$\text{日照百分率} = \frac{\text{实际日照时数}}{\text{理论可照时数}} \times 100\%$$

【实习作业】

1. 辐射表测量辐射强度的基本原理如何？辐射表主要有哪些类型？
2. 照度计测量光照度的基本原理如何？使用照度计应注意哪些事项？
3. 昆明（25°01'N）某年8月9日的日照时数是7.6h，求该日的日照百分率。
4. 某地（32°00'N）某年的年总日照时数是2 088.6h，求该年的日照百分率。

实习二 温度观测

【实习目的】

通过实习掌握各种常用温度表 and 自记温度计的构造原理和使用方法，并能独立完成测温仪器的安装、观测读数和温度记录的整理工作。

【实习仪器】

普通温度表、最高温度表、最低温度表、曲管地温表、自记温度计、百叶箱等。

【实习内容】

一、测温原理及温标

任何物质的温度变化，都会引起自身特性的改变。热胀冷缩反映了物质物理特性（体积大小）与温度之间的定量关系，我们可以利用物质的这种特性来测量研究对象的温度大小及其变化。

温标是用于衡量物体温度大小的量度标尺。制定温标时，常以标准大气压力下纯水的冰点和沸点作为基准点，再把这两点之间等分为若干份，每份为一度。常用的温标有摄氏温标、华氏温标和绝对温标，我国的气象工作和日常生活中均采用摄氏温标。三种温标的换算关系如下：

$$\text{摄氏温标 (}^{\circ}\text{C)}: \quad t(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} [t(^{\circ}\text{F}) - 32]$$

$$\text{华氏温标 (}^{\circ}\text{F)}: \quad t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} t(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\text{绝对温标 (K)}: \quad T(\text{K}) = 273.16 + t(^{\circ}\text{C})$$

二、温度表的种类及构造原理

温度表（玻璃液体温度表）一般采用水银或酒精作为测温液体，利用水银