



遥感手册

第十分册



国防工业出版社



87.9073
340

遥 感 手 册

第 十 分 册

〔美〕 昆廷 L·威尔克斯 等编著
维克托 I·迈耶斯

李克让 王在德等 译

国防工业出版社

8710196

0036/15
内 容 简 介

《遥感手册》比较全面系统地介绍了遥感技术及其应用的各个方面，内容丰富，具有一定深度，全书共分十二个分册出版。

第十分册是原书的第二十一章和第二十二章。第二十一章叙述遥感在气象学和气候学方面的应用，介绍了探测天气参数的各种遥感手段，卫星遥感大气的原理、方法、水平、成果和发展，大气污染的遥感及气象卫星的发展等。第二十二章论述遥感在作物监测和土壤调查中的作用。介绍电磁辐射与作物和土壤的相互作用机理，遥感用于识别作物、预报产量、土壤制图、农业上病虫害与洪水灾害的探测等原理、方法和应用举例。

本书可供从事这方面工作的科研、工程技术人员和大专院校师生参考。

Manual of Remote Sensing
Quenten L. Wilkes and Victor I. Myers et al.
American Society of Photogrammetry 1975

遥 感 手 册

第 十 分 册

昆廷 L·威尔克斯

【美】 维克托 I·迈耶斯 等编著

李克让 王在德等 译

张声荣 刘益梧等 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/16 印张 14 322千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷 印数：0,001—1,320册

统一书号：15034·2922 定价：3.35元

0010178

译 者 的 话

美国摄影测量学会集中了数以百计的有关科学家和工程技术人员,从1969年开始,花了约近六年时间,编辑并于1975年出版了这本遥感手册。遥感技术作为一门新兴学科,随着空间科学技术的发展,近十多年来进展很大,获得了多方面的应用,对促进国民经济发展和国防建设都有很大作用,因此,当前世界各国都对它给予了必要的重视。在遥感领域中,本手册是迄今较为全面而在技术上又有一定深度的书。为配合我国遥感技术的发展,我们请各方面的同志共同翻译并出版这本手册,以供有关科研、教学和工程技术人员参考。由于遥感技术本身是一门新学科,应用范围又特别广,加之我国在这方面的发展起步不久,有些定名和理解可能还需商榷。

原书分上、下两卷出版,计二十六章加一个遥感小辞典。我们考虑到编辑出版的方便,分十二个分册出版:

- 第一分册 遥感基础 (第一至第五章);
 - 第二分册 光学和电-光传感器 (第六至第八章);
 - 第三分册 微波传感器 (第九章);
 - 第四分册 遥感器的运载工具、数据传输及遥感地面研究 (第十、第十一和第十三章);
 - 第五分册 遥感数据的处理与管理 (第十二章);
 - 第六分册 图象判读和制图 (第十四和第十五章);
 - 第七分册 遥感应用:地质勘测 (第十六章);
 - 第八分册 遥感应用:森林与草原 (第十七和第十八章);
 - 第九分册 遥感应用:水文学与海洋学 (第十九和第二十章);
 - 第十分册 遥感应用:气象学及作物与土壤 (第二十一和第二十二章);
 - 第十一分册 遥感应用:城市环境与区域工程规划 (第二十三和第二十四章);
 - 第十二分册 遥感应用:区域分析与社会科学 (第二十五和第二十六章)。
- 本书封面特约张博智同志设计。

目 录

第二十一章 天气和气候：测量与分析

1. 前言	1
2. 用于天气预报和气候学的 遥感技术	1
3. 利用卫星遥感地球大气	6
3.1 发射率的特性	6
3.2 大气温度的测量	8
3.3 大气成分的测量	9
3.4 大气成分分布的测定	11
3.5 大气成分浓度的测定	11
3.6 飓风跟踪	16
3.7 用雷达和激光雷达测定降水情况	25
3.8 利用卫星测风场	28
3.9 利用卫星图像估计降水	29
3.10 利用卫星测量水汽	31
3.11 雷暴环流的遥感	33
3.12 海面风	34
3.13 遥感天气数据的电视显示	35
4. 卫星遥感的最新结果	36
4.1 监测恶劣天气	37
4.2 来自恶劣雷暴的重力波	38
4.3 可见光、红外和水汽通道 数据的比较	41
4.4 流冰群的增长	46
4.5 夜间的红外遥感	47
4.6 天气图分析	49
4.7 可见光夜间遥感	55
4.8 地表现象	61
5. 大气污染	71
5.1 大气污染物的分类	73
6. 气象卫星系统	86
6.1 美国空军的国防气象卫星计划	87

6.2 美国国家海洋大气局的艾托斯卫星	92
6.3 美国国家海洋大气局的 地球静止业务环境卫星	98
7. 空间气象学的未来	103
7.1 天气尺度的预报	104
7.2 大气污染测量	105
7.3 气候	105
7.4 天气灾害和灾害预报	105
7.5 云物理学	106
参考文献	106

第二十二章 作物和土壤

1. 前言	109
2. 植被	109
2.1 影响电磁辐射的生理因素	109
2.2 作物的识别	123
2.3 作物产量预报	138
2.4 时间鉴别分析	145
3. 土壤	147
3.1 影响土壤反射比和 发射比特征的因素	147
3.2 土壤制图	153
3.3 土壤水分	171
4. 能量收支	191
4.1 引言	191
4.2 辐射平衡的遥感测量	192
4.3 小结	200
5. 农业生产的限制	200
5.1 昆虫与病害	200
5.2 风蚀	205
5.3 盐渍度	206
5.4 洪水损害	208
5.5 土壤利用的限制	209
参考文献	210

第二十一章 天气和气候：测量与分析

1. 前 言

在过去二十五年间，气象现象的观测和预报已出现了引人注目的变化。1948年首次提出的数值预报方法获得成功并得到证明。在马里兰州的苏特兰已建立了第一个使用计算机作业务预报的天气预报小组^[46]。在五十年代后期，由于采用了较好的能更近似地描述大气的数学模式以及计算机的容量的增加，使数值预报方法不断得到改进。

六十年代初期，由于上述条件的进一步改善，天气预报开始得到明显的效益。那时，数值预报技术已经得到实用，但使用仅能在有限的实验地区进行，而所用数据大部分还是从地面测量取得的。这样，由于常常不能及时获得有关数据以及输入数据的地理分布也不很均匀，使之不能满足数值预报业务的需要^[61]。

要达到气象数据的实际应用，既需要有相应的量测或感测方法，也需要有为进行计算机处理所要求的收集单个地点的有关数据的方法。为了迅速汇集常规的地面气象数据，美国空军于1965年建立了自动气象网(AWN)。利用计算机联机通信系统的超高容量线路，自动气象网可向内布拉斯加州的奥弗特空军基地的美国空军全球气象中心和马里兰州的苏特兰美国气象局计算中心及时提供全球范围的数据。

气象卫星为迅速收集有关数据和资料提供了另一种有效方法。1970年以来，用卫星图像资料来提供全球范围的气象信息已是很平常的事了。虽然，卫星能给预报人员提供全球的覆盖、精确的风暴位置、风暴区的大小以及风暴强度的某些信息，但是要把这些信息有效的综合到数值分析中去仍然是一个问题。因此，目前大部分气象卫星资料的应用还是用手工方法进行的。

数值模式中的许多问题，是由于初始参数化的误差以及所得数据资料站点的分布不好造成的。然而，在七十年代初，有两项重大的进展。一个是美国空军全球气象中心的云层的三维分析(3D NEPH)，它能把可见光到近红外(0.4~1.1微米)和热红外(8~13微米)遥感器的卫星资料完全用于有关业务。另一个是美国国家海洋大气局(NOAA)的美国国家环境卫星局(NESS)成功地发展了获得参数化的垂直温度数据的卫星遥感技术。这些传感器能通过大气进行垂直探测，它类似于但不同于气球携带的无线电探空仪。虽然，使用卫星进行大气遥感实际上已有多多年了，但为了尽可能广泛地应用这些数据资料并处理大量的数据，需要先进的计算机分析技术。

本章将着重介绍某些最有应用前景的遥感手段以及如何把这些遥感数据用于气象学和有关问题上。对于从事气候工作的读者，有关这方面的问题可以进一步参阅巴雷特的著作^[1]。

2. 用于天气预报和气候学的遥感技术

1968年以罗伯特·G·弗列杰尔为主席的美国国家科学院(NAS)大气科学委员会通

8710196

过专门小组（以戴维·阿特拉斯为组长）就下列九种有关的大气遥感技术审查了测量的需求，并提出了建议：（a）激光雷达；（b）雷达和双站雷达；（c）红外技术；（d）微波辐射测量；（e）声学技术；（f）天电学；（g）波束互相关技术；（h）微波视线传输技术；（i）可见光和红外光的视线传输技术。这里按照它们在观测能力方面的优劣以及对有关大气结构和过程数据获得的多少依次予以介绍^①。

激光雷达（光探测和测距）类似于微波雷达，它发射一个脉冲，然后作为时间或量程的函数测定其反向散射信号。通过激光雷达测量反向散射信号强度，可以得到30公里高层的空气密度分布并能绘出气溶胶分布图。根据喇曼散射，它是由于散射分子的状态发生变化所致，可以求得特定的大气成分。不同的吸收可提供关于浓度分布方面的信息。多普勒技术可用于确定温度、风速以及速度梯度。双站激光雷达探测可给出浓度和大小分布方面的信息。卫星激光雷达是很有作用的，因为它的激光束的独特性能有助于研究气溶胶大小的分布。激光雷达随着激光功率和脉冲重复频率的加大，可以发展用于绘制气溶胶的空间分布和运行图。

耶茨（1970年）在《大气遥感概论》一文中阐述了卫星应用主要发展趋势将是由被动式变为主动式遥感系统^[81]。大气成分的激光探测，包括探测各种云和气溶胶以及来自固态与液态粒子的直接反向散射，都是应用宽的激光频率。共振、喇曼和荧光散射正被考虑用作定量探测，主要是对污染的定量监测。

雷达探测测量反射率和多普勒频移，也还包括衰减、风暴中总水汽含量的测定以及表示微粒形状和水的状态的极化效应。用雷达测定悬浮微粒散射和风暴结构，因而能提供关于雨和雪的瞬时分布、云和风暴的方位和高度、对流云的增长速度、融化层的高度、云泡和风暴的运动以及雨幡结构等方面的信息，这些都与风和风切变有关。灵敏的、甚高分辨率的调频连续波雷达可探测大气波动，尤适于探测以开尔文-赫姆霍兹(Kelvin-Helmholtz)波的形式出现的高空湍流。多普勒速度的测量已成为取得对流系统中的整个三维空间风场的手段。为确保三维空间的稳定测量，需要三个雷达系统。用多普勒雷达探测陆龙卷是对这种标准系统的一个改进，它可探测寄寓于陆龙卷的风暴系统。假如雷达探测的目标物存在于一活跃的体系中，接近于惯性亚波段的湍流的高频谱也可以测定。用雷达探测闪电，可对灾害性闪电提供报警信息，并可提前掌握风暴出现的特征。

关于全球范围的热量和水分平衡的雷达制图以及关于较小区域的水文和小气候作用的雷达制图，目前还没有得到充分发展。为了提供最大的覆盖面积，地面雷达站网应当与气象卫星、气象观测船或海洋上漂浮的自动雷达站结合起来。航空雷达周期性或间隙性地用来提供更详细的情况。数据自动化处理的进展可用于提供实时的定量信息，作为预报和水量管理程序的输入。

双站雷达散射技术是用来探测经常与逆温相联系的薄散射层的，并测量运动的横向分量。现在利用双站系统已不能满足要求，正如惠勒(Wheeler)指出的（见NAS报告，第Ⅱ卷），大气的非均匀散射理论需要加以全面重新评价。这就只有充分了解基本的散射机制，才能有效地使用双站雷达探测技术。有人曾经对对流层折射结构的不规则性进行了充分的测量，并估算了晴空的风和湍流，但是，还需增加和扩大研究力量，才

① 这些建议详见1969年出版的《大气的遥感探测》(Atmospheric Exploration by Remote Probes)一书的第一卷。

能加强我们对迄今仍了解不多的平流层的观测。

红外技术用于测量地球的温度是很有效的。大约在 300°K 时, 波长为 $10\sim 20$ 微米 (红外谱段) 的热辐射通量最大。云顶、地表和其它物体在这个谱段进行辐射, 从而表示了它们的温度。测量云的辐射率 (radiance) 可以估算出云高和风暴的强度。有关云量和温度的许多实验性的航空测量和卫星测量, 甚至在夜间, 都已被充分证明是可行的, 只要进一步提高空间分辨率就能测量云的运动。

对气象学家而言, 大气遥感的巨大进展之一就是可以通过反演方法来推知温度、水汽和臭氧的垂直分布。在无云的情况下, 根据波长为 15 微米 (或 4.3 微米) 的 CO_2 吸收谱的辐射数据的反演, 我们可以得到自地面到 20 公里高的大气垂直温度分布。同样, 也能由 6.3 微米的水汽吸收谱得到水汽的垂直分布以及由 9.6 微米吸收谱得到臭氧的分布。这一方法可以扩展到部分有云甚至全部有云覆盖的状况下进行工作。然而, 霾和薄云的覆盖将会降低其效果。人们还发现反演方法的准确度与地面和无线电探空仪的测量是十分一致的。

污染物 (CO 、 SO_2 、 O_3 、 NH_3 、 NO_2 、典型的碳氢化合物和过氧乙酰硝酸盐) 的遥感, 在一定程度上, 已在红外谱段上实现了。在最近的研究中^[37], 已计算出在多数的大气状况下, 用卫星可以探测出清洁大气与污染大气之间的百分之一的信息变化。用与参考气体的光谱仪读数进行比较的各种方法, 证明是有成效的。

对地面的垂直探测正被应用于探测大气的沾污和工业中心附近的污染物。根据红外谱段的反演方法, 有可能用于探测 SO_2 、 H_2S 、 CH_4 或氮氧化物。地面上的激光探测已成功地用于确定夜光云的散射。使用这类主动遥感手段, 而不用被动遥感手段, 表明前者有希望提供关于气溶胶、烟、尘埃、霾和烟雾方面的定量数据。主动式激光系统已用于测量云和雾的凝结过程、微粒浓度以及微粒大小的分布。

利用气球和飞机的红外遥感可以探测包括与晴空湍流有关的温度波动。使用上升气球, 把向上和向下的辐射细节记录下来, 就可以用于辐射传输机制的研究。

虽然, 傅里叶光谱学的理论很久就已知道了, 但红外干涉仪作为一种最新技术才初露头角。随着快速、大容量计算机的使用, 可以把测量数据分解成为常规的频率随波长变化的光谱强度图。红外干涉仪的优点在于能感测弱源的信息。然而, 这个优点在数据处理上却要付出很大的代价。傅里叶光谱学已经十分出色地应用于火星和金星大气的遥感。

在很大程度上, 红外遥感仍然是一种晴天状况下的遥感仪器。它不象微波辐射那样, 能透过雨、雾和云。对许多红外吸收谱带, 如臭氧谱带, 还没有可用于发展精确的反演方法的完整实验室资料。

微波 (波长为 $0.5\sim 3$ 厘米) 辐射计探测是一种被动式探测方法。从地面上对大气的观测, 是测量来自外部能源 (如太阳) 的大气吸收, 因此, 在空间和时间上大部分观测都仅限于到太阳的视线路径, 多频微波遥感手段要比天顶角扫描技术好些, 它求得的直到 $7\sim 8$ 公里温度结构的典型精度为 $1\sim 2$ 公里。天气系统可以用频率为 10 千兆赫或 22 千兆赫的被动式遥感手段探测。然而, 要将这些观测与降水云的瞬时雷达观测相结合, 就应有更完善和更有效的图像可供利用。

利用气球和飞机进行的波长为 0.5 厘米的被动式微波观测, 如果有足够的温度异常

出现, 就可以揭示出晴空湍流。所有地面观测的结果都有助于说明星载遥感设备测量结果的判读。

星载微波观测的波长将大于 1.5 厘米 (反映地球表面的特性, 并为了避开 O_2 的发射带波长 1.35 厘米)。60 千兆赫的微波观测可得到温度分布信息, 而不受云的影响, 其温度分辨率为 $2^\circ K$, 高度分辨率为 10 公里。这表明, 微波观测最终有可能超过红外光谱测量技术。

声学技术对在靠近大气边界层进行测量是有用的。在频率非常低的次声波区, 大气吸收声能是很微弱的。已有的许多研究主要侧重于寻找已被探测的能源的性质和位置。已经确定和研究的次声源有: 地震、火山、海洋的重力波、陆龙卷、急流和极光。次声能在全局距离范围上传播的能力, 为研究选定大气层次的全球风场提供了可能。

用声学手段遥感低层大气主要限于低于 15 千赫的低频部分。利用自然声源声波的大气被动式探测, 将可记录下风吹传声器或邻近目标物的噪声。目前, 已能探测远距离的强风暴和陆龙卷次声能。主动式的视线声学探测如同那些已制成的声学风速表一样, 可以测量风和温度。然而, 湿度仅限于 (第二位的) 影响声音的相位速度。用一排传声器, 就有可能测量约 10 厘米/秒左右的风速。温度测量的精度可达 $0.2^\circ C$, 水汽压的精度约为 1 毫巴。而根据传声器接收的功率随发射频率变化的研究, 平均湿度的测量精度约为 10%。

火箭榴弹技术已用于求得直到 90 公里高度的风和温度分布的数值。飞机可以利用它的发动机作为声源, 或装配窄波段连续波源, 其办法和测风榴弹法类似。

用声学的散射技术来遥感边界层, 有可能得到直到 1500 米高度的下列大气信息: (a) 平均风速和风向廓线; (b) 湍流运动的三维图, 即机械湍流强度随高度、波数和方向的变化关系; (c) 非均匀温度的三维分布; (d) 逆温的位置和强度; (e) 湿度随高度变化的信息。

声学技术的这种能力是任何其它单一技术所没有的, 并且因为它可以用于小于 30 米的很短的距离, 所以它可以作为雷达的补充。声学方法的局限性在于它的作用范围很有限, 以及在有风暴时和人类活动的声学干扰。

向量风的测量精度为 10%, 机械湍流和温度的非均匀分布的测量精度为 30%。时间和高度的分辨率量级约为 10 秒和 10 米, 此时空间波数为 $10^{-2} \sim 400 \text{米}^{-1}$ 。由于声学技术在某些方面有其突出的长处, 所以小组委员会认为, 对声学技术的进一步发展应给予优先注意。最近的进展^[28]改善了声学的回波探测技术, 因此, 在大多数情况下和大部分地区 (除靠近飞机场地区外), 单站音响器可用来揭示城市和工业区的热逆温的动态变化。按照迪尔等人 (1970 年) 的意见^[18], 用光学、雷达和声学遥感技术可提供大气密度随空间和时间变化的测量, 再通过大尺度的气象实验可改进天气预报。

声学的多普勒技术已被用于描绘垂直速度和破碎波的构成^[4]。用同样的技术, 但用三个分开的单站系统, 通过对合成风矢量的测量可揭示出 500 米以下的大气、周期以分为量级的水平风的变化^[3]。

天电一般是指由于闪电放电造成的无线电干扰, 并且在它们朝向测站传播时会发生变化, 其发射大约超过一秒钟一周。发射源的方向和信号强度可用于观测雷暴活动的范围。利用天电观测网可为我们增进以下几方面的知识: (a) 解释热量、湿度和动量的垂直输送机制的大气中的深对流; (b) 对流层和平流层之间的大气性能的交替情况; (c)

在资料稀少地区的闪电的出现情况；(d) 无线电干扰；(e) 森林火灾的可能性。在某些情况下，天电观测还可测量对流风暴的强度。

天电地面观测分辨率可通过天电观测网的三角测量提供。利用卫星探测天电受到电离层的阻碍。卫星上的仪器仅能粗略提供世界范围的闪电活动，但地面观测站网可以得到更为真实的估算。工作频率为 300~3000 兆赫（波长 10~100 厘米）的微波接收机，也能探测天电。这类设备要比低频设备能提供好得多的辐射源的空间分辨率。最近关于闪电的光谱研究，已揭示了闪电通道中的离子密度和温度数据。

波束互相关技术已发展用于研究湍流的特性，来自一个共同体的两个探测器的信号的互相关，能得到关于扰动强度、湍流的积分度、风速和湍流谱方面的信息。这一技术已成为空气动力学研究的一种手段，在大气中利用阳光的被动互相关已得到了较好的结果。利用交叉波束实验探测散射阳光扰动，尚存在一些明显的问题。云层会引起很大的扰动，因此，需要研究水汽热发射扰动的感测问题。如果这个问题能够解决的话，云下层的风就能够被测量出来。用一个非相干源，如探照灯，或者用一个相干源，如高功率双站连续波激光，就可以实现互相关的主动测量。为了测量风速和湍流，还需要有另外的双站系统，后者在同样高度上用一个相交的体积，而它与前一个系统的体积是分开的。如果水平的风向通过这些体积，则飘移的湍流单体和它们的变化，就会在两个检测器上产生相关脉动，时间滞后与飘移速度有关。这就相当于有两个点的探测。这时，信噪比应该进行检测，扰动应超过系统的噪声。

微波视线传输技术可得到以下有关大气特性方面的信息：(a) 在路径上每一段积分的总氧气量和总水汽量；(b) 折射指数波动的振幅和折射光谱分布、它的各向异性、内部变化率、随气流的飘移；(c) 所有这些量沿路径分布的某些征兆。

频率从 5~95 千兆赫都是实用的。量级为 3 毫米的波长可用于几公里的路径，来探测雾中液态水的含量。因为水滴与波长相比还是很小的，因此可以忽略由于它们的分布所引起的衰减效应。为了便于确定频率在 90 千兆赫附近、尺度在 2 米以下以及频率为 10 千兆赫、尺度在 25 米以上的大气波谱，本文介绍了一些测量结果。其它还介绍了 60 千兆赫的氧吸收和 22 千兆赫的水汽吸收的衰减测量结果。卫星对地面的测量必须与详细的气象观测相结合。

光学和红外视线传播，不管是地面观测站还是空间观测站，都受到大气的影。大气参数可以从测距器的视线数据推出，它们包括平均路径温度、温度梯度、湍流、温度和风的结构、沿路径的液态水含量、气体成分的积分密度。

上述九种遥感技术都具有很好的应用前景，但它们并不是万能的。除声学的和次声学的频谱范围外，整个电磁波谱都能用于气象学的遥感。

已经有许多卫星携带的遥感器，在选定的电磁波谱段进行工作。而其它谱段的遥感测量尚有待于有效的滤波器和探测器的进一步发展。

探测显著的大气湍流是有可能的，因为光学和红外谱段对传输介质的非均匀性是十分敏感的。为了进一步了解波通过清洁大气和降水时的物理传播过程，应当在各种大气状况下，在地面上进行视线测量的研究。

按照利特尔 (1971 年) 的文章⁽⁸⁶⁾，波传播实验室 (Wave Propagation Laboratory) 最近完成的研究有：

(a) 根据多普勒频移原理, 在一个双站装置里利用了两个声学天线, 测量水平和垂直风的精度为 0.5 米/秒;

(b) 证明了用喇曼激光雷达测量大气温度的波动和定量测量大气中水汽的可行性;

(c) 一个已经连续工作六个月以上的系统, 测定了路径在 15 公里以上的平均风速, 用的是激光波束闪烁图型的统计处理方法;

(d) 研制成功在 50~60 赫频段工作的多频辐射仪, 可测量天空亮度以及大气温度分布;

(e) 一种新研制的计算机程序通过气旋风场可计算出声波路径, 从而显示出飞机尾迹的涡旋和天气尺度的高、低气压系统;

(f) 用高频 (HF) 海面散射仪可以遥测海洋波浪谱和平均表面速度。

3. 利用卫星遥感地球大气

对小尺度气象学问题的研究, 可以在当地用接触式传感器进行, 但对大尺度天气过程就只能依靠飞机或卫星进行研究, 或者设置昂贵的地面观测站网。地面观测站网因为花费太大, 而使用飞机又很危险, 所以对大气的大尺度研究, 采用安放或逐点设置传感器的办法是很不实用的。

利用卫星遥感大气, 已有多年的历史了, 并取得了很大的成就。气象学利用卫星进行观测, 取得成功的重要原因是很明显的, 因为首先被“看到的”是大气, 事实上, 为了观测地球表面, 也必须透过大气。利用卫星观测地表时, 各种云和笼罩着地球的一层蓝色气体, 通常构成了一种讨厌的滤光器。

3.1 发射率的特性

3.1.1 一般关系

从大气上面以小于 3.0 微米波长观测地球表明, 在白天几乎全部是散射和反射的阳光; 在夜晚则有微弱不变的极光或辉光 (*glow*)、各种照明灯光、散射和反射的星光与月光。用大于 3.0 微米波长观测时, 不论夜晚还是白天, 主要是地球和大气的发射。地球本质上是一个灰体, 所以它的发射率 (*emissivity*) 基本上与光谱无关, 而大气的发射率变化在很大程度上则是波长的函数。因此, 地球和大气二者的组合就呈现出了一个极为复杂的图像。

大气的气溶胶 (由悬浮的固体和液体粒子、尘埃、霾、云等组成) 是灰体, 但是, 由于这些粒子的直径小于 10 或 15 微米 (较大粒子会降落的), 所以它们能减弱较长波长光的散射能力和降低发射率。大气的气体具有高发射率的窄波段或吸收带, 在这里大气的总发射率依赖于特定吸收带的强度和组成气体的浓度。如果吸收带是强的并且气体很丰富, 则仅几英尺的大气就可能是不透明的 (发射率为 1)。如果吸收带是微弱的并且气体稀少, 则整个大气几乎完全透明。

通过选择特定的吸收带, 在广阔范围的发射率中可以选择用于观测某部分大气发出的总辐射量。这种特性非常重要, 并将在以后的章节里给予充分的讨论。

在地中海, 海面温度约为 290°K, 连续区较低, 但空气的积分温度, 正如在 630~700 厘米⁻¹ (15.87~14.29 微米) 之间底层 CO₂ 吸收带所显示的那样, 比撒哈拉的还要

高。臭氧 (O_3) 主要集中在平流层, 正如 1040厘米^{-1} (9.62微米) 吸收带所显示的, 在地中海上空较冷。在南极上空, 不论 CO_2 还是 O_3 , 都比下面高原的冰、雪暖, 而且较明亮 (见图21-1)。

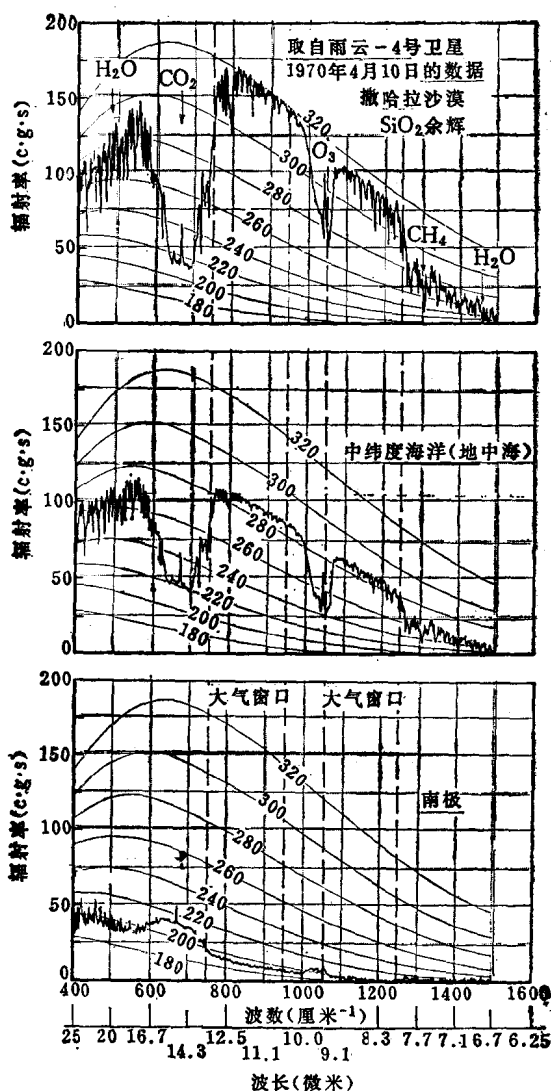


图21-1 地球热辐射光谱〔取自非变迹 (unapodized) 红外干涉光谱仪-D 的实验结果〕

大气窗口的谱段为 $750\sim 950\text{厘米}^{-1}$ ($13.33\sim 10.52\text{微米}$) 和 $1050\sim 1250\text{厘米}^{-1}$ ($9.52\sim 8.0\text{微米}$), 从图21-1的上、中、下图可推出表面温度分别为 320°K 、 285 和 200°K 。作为沙漠大气主要成分的二氧化硅 (SiO_2) 的发射率在两个大气窗口之间明显降低。因此, 第一张图上, 在第二大气窗口的表面温度只有 300°K , 而第一大气窗口为 320°K 。

● 原文为 312°K , 从图上看应为 320°K , 似有误。——校者

● 原文为 312°K , 从图上看应为 320°K , 似有误。——校者

CO₂ 和 O₃ 吸收带的中心为一尖峰形, 这是一个很有意义的特征。CO₂ 吸收带的特性说明了在这两个带之间的主要差异。在撒哈拉和地中海, CO₂ 吸收带是一个很高发射率的谱段, 在平流层上层它变得不透明。它比其它吸收带更为明亮, 这是因为它只“看见” 30公里及其以上的平流层的空气, 那里的温度重新开始上升。O₃ 吸收带中心的尖峰为一较低发射率的谱段, 通过平流层向下可“看到” 较暖的对流层。这些特性在南极地区正好相反, 在那里, O₃ 吸收带中心的尖峰通过平流层向下“看到” 的是较冷的对流层。

3.1.2 温度对发射率的影响

若地球及其大气为同一温度, 用卫星遥感器观测到的辐射将表现为灰体的温度。作为定性的分析, 如果空气比地球暖, 则其中各种气体的吸收带所发射的辐射量将比空气吸收的要多。水汽、二氧化碳和臭氧是主要的红外吸收体; 稀有气体、CH₄、CO、N₂O 等都被观测到, 但不够清晰。如果空气比地球冷, 通常都是如此, 那末吸收带在地球发射的连续波中有一个下降区。

真实大气的温度分布和地球背景产生的热辐射特征组合起来的情况, 如图 21-1 所示^[20], 它是用雨云-4 的红外干涉光谱仪 (IRIS) 记录得的世界三种典型地区的情况 (这种仪器在第八章已介绍过)。把这些光谱曲线与标准黑体曲线进行比较, 可看出与光滑的黑体曲线有偏差, 这是由于大气的吸收和发射源的发射率随波长变化造成的。

撒哈拉沙漠, 温度接近 320° K, 黑体曲线在大约 620 厘米⁻¹ (16.1 微米) 波长处有一峰值 (注意, 黑体曲线峰值是作为波长厘米⁻¹ 的函数画出来的, 不同于以波数厘米⁻¹ 的函数画出的图)。大气中的水汽、二氧化碳、臭氧和碳氢化物, 全都比撒哈拉冷一些, 并显示出吸收带。

3.2 大气温度的测量

大气温度可以用红外辐射计, 针对某种非常不透明的气体成分吸收带进行中心或分光测量。实际测量的是整个路径上气体成分的积分温度, 这就需要给出一个基本上是不透明的感测, 因而发射率才等于 1。如果在吸收的路径上, 没有温度梯度, 并且大气处于热力平衡状态, 则很显然, 这样测出的温度才是可靠的温度。这一技术特别适用于高速飞机上利用, 因为在有冰雪加热和其它影响时, 用一般方法很难以得到可靠的温度。

一种称之为自由大气温度计 (FAT) 的仪器, 它能滤掉 690 厘米⁻¹ (14.48 微米) 附近的 CO₂ 吸收带的中心部分, 这种仪器已经有效地用于现代化飞机上^[11]。问题是在飞行期间, 特别是由于窗口的加热造成仪器的温度变化, 为了达到不透明性, 路径长度[●]明显地要随高度而增加。然而, 从亚音速飞机可以得到误差比 ± 1 °C 还要好的可靠温度测量。

● 在光谱学里, 通常是用波数 $\tilde{\nu}$ 代替频率, 波数是指真空中每厘米波的个数。 $\tilde{\nu}$ 的单位可写成厘米⁻¹ (cm⁻¹)。0.4~0.7 微米以 25000~14000 厘米⁻¹ 表示; 0.7~10 微米为 14000~1000 厘米⁻¹, 10~100 微米为 1000~100 厘米⁻¹。因为以下给出的参考资料都用波数, 所以这里也保留使用这一单位制, 波长微米为易于与本手册的其它数据相比较也一并给出。

● 路径长度是指通过大气 (可能包含了上述部分或全部的气体) 到目标物 (地球、物体) 的距离, 辐射效应是指在整个这段距离的积分结果。

红外大气温度计的重要应用之一,是寻找可能与晴空湍流(CAT)有关的异常温度梯度。这一应用是可以实现的,因为辐射仪的输出是与仪器光学路径的积分结果成比例的。如果某一通道(不透明性很高,因此,路径是短的)的辐射率可与另一通道(不透明性低,因而路径长)的辐射率进行比较,并且空气在两条路径上是等温的话,则它们之间将不会出现明显的差异。但如果在距离上超过较短路径,存在较冷或稍暖的空气,那末其它通道将相应地显示出较小或较大的辐射率。根据这种想法作了大量测试,并且在有关的学术讨论会上报告了试验结果。

这种探测晴空湍流的概念尚未确证其实用价值。一个很重要的问题是要有一个俯仰角能很好稳定在 0.1° 的遥感器,以保证当积分路径增大和减小并且碰到正常的大气递减率,即每1000英尺高度平均变化 2°K 时,能记录到大的温度变化。而且还需知道伴随着全部或大部晴空湍流而发生的异常温度的结构。

3.3 大气成分的测量

大气的成分无论是从研究角度还是为了控制目的,都是非常重要的。大气化学和大气动力学研究就需要测量其所有成分的性质和分布。污染的研究和控制需要有精确的定量测量污染源和附加给大气的污染物性质的手段。接触法,虽然精密度和准确性一般都非常好,但是太慢、不经济,且受距离限制。因此,遥感技术无论是被动还是主动的,都得到研究和发展,它们特别有助于污染的监视。这些手段都要依赖光谱学来识别每一种特定的物质,并且在某些情况下,还要定量地测量它的浓度乃至分布。正如第五章所述,被动遥感手段包括吸收的和发射的光谱测量,而主动遥感手段则包括利用激光去激励谐振或喇曼散射。

3.3.1 吸收光谱

吸收光谱需要有一个辐射源,这个源应比欲待研究的介质热或亮。在大气遥感的应用中,当从地球表面,或从火箭或空间飞行器通过地球临边[●]成正切方向观测时,通常不是以太阳就是以月亮为辐射源。然而,也可以从飞机或空间飞行器来观察地球表面。在后一种临边测量的情况下,可见光和紫外光谱段是大有希望的,特别是当需要取得定量测量时更是如此。

吸收光谱有效地应用于测量诸如水银、碘和二氧化硫(SO_2)之类的大气蒸汽,已由飞机和气球的观测所证实(Barringer和Schock, 1966; Barringer, 1964)。所用的分光计由于装备了一普通光栅仪器加一块相关蒙板,所以灵敏度很高,相关蒙板只适合于待测成分的光谱结构。蒙板是用以拍摄仪器里待测物质的光谱的,然而,在分光计焦平面里安装了摄影光谱蒙板(或它的反面),这样它能振动或振荡来自观察源的一狭窄弥散辐射的偏移。如果在观测的光谱中,有特定的吸收成分,则当交替信号的频率为 2ω 时,它将被显示出来,其中 ω 为蒙板振荡时的频率。其它未相关的光谱结构将在别的频率处出现,并且能用电子仪器过滤掉。

这个方法基本上与本尼迪克特⁽⁷²⁾为增加用于从高空气球来测量金星大气的水汽的红外分光计的选择性、灵敏度而采取的方法是一致的。由于可见光和紫外光谱区的浓度

● 临边(Limb):地球、太阳、月亮或行星的圆球形的边缘。

效应（它使摄影胶片制成的蒙板能准确的与光谱结构的等级相匹配），已报道的这种技术可以测量少于百万分之一的浓度。

关于外场应用所遇到的问题有云的干扰和地球（仪器的光源）亮度的变化。当仪器看见光源亮度波动时（如水的闪亮或不同反射率的地形），交替信号出现在 2ω 处，从所要求的信号来看，它们是不可分辨的。也应注意到，仪器只是测定大气路径上所观测到的总吸收，但不能测量分布状况。

由于可通过地球临边观测太阳，所以高层大气的吸收光谱测量技术是一种非常有效的和有前途的手段。然而，它只是对平流层及其以上部分才是可实现的，这是因为云的存在，使对流层基本上是不透明的。它的最简单的形式是利用常规的多通道分光计或辐射计，用一个或多个通道去观测待测成分的吸收谱段的特征，并且要尽可能在靠近吸收带的无吸收谱段至少有一次观测。带内通道与带外通道的输出比率跟吸收带的光学不透明性有关，在某种意义上来说，它也与对路径上总的吸收量所能做的校准方式有关。从不同角度进行观测，也就是从平流层底部向上到大气上界的整个路径上进行观测，就能推导出组分浓度的分布。

图21-2示出了对平流层水汽量进行观测的结果，它是由戴维·米勒及其在英国气象局的合作者们搞出来的（Miller, 1971）。1970年夏，在澳大利亚武麦拉试验靶场，云雀探空火箭曾携带了一台两通道辐射计遥测了大气。由于发射是定时的，因此当火箭上升时，可通过地平临边观测太阳，并且用一个中心在 3830 厘米^{-1} （2.6 微米）的 15 厘米^{-1} 宽的滤光片，通过测量 2.6 微米水汽吸收带的吸收就可计算出水汽的浓度。图中画出了测量点（测量是用自旋稳定火箭，每看见太阳就旋转一次），同时画出了计算出的水汽的百万分之三和十的等值线。

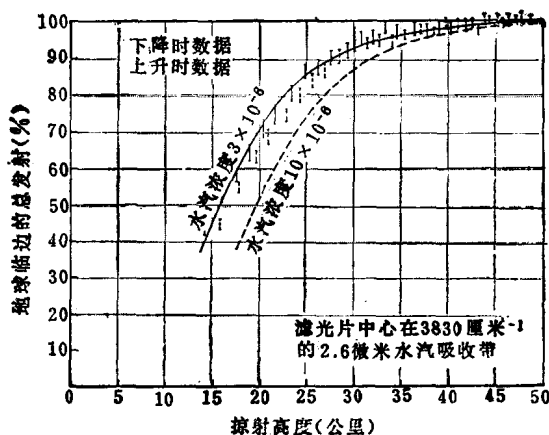


图21-2 用探空火箭测量，根据发射光谱画出的平流层水汽的定常混合比

在过去的几年里，用太阳作为一个辐射源，地球表面的吸收光谱已成为有效的遥感工具。世界气象组织进行了大气中臭氧浓度的常规测量，所用方法是观测在一天不同的时刻通过不同空气质量的臭氧光谱（所谓 Umkehr 法）。吸收光谱对观测污染物并追踪其组成来说，仍然是最灵敏的方法。

3.3.2 发射光谱

观测发射光谱特征，如同观测吸收光谱一样是可能的。但是，因为大气和地球的温

度是在 $200\sim 300^{\circ}\text{K}$ 之间,所以仅能在波长超过3微米的红外和微波谱段的能量可以感测到。在发射光谱的定量测量中,一个重要的问题是能量的发射为温度和浓度的函数,而光以受温度的影响更大。因此,如果不知道待观测气体的温度,就只能单从发射光谱来测量浓度。然而,如果温度已知,则就可从发射光谱中测得浓度和分布。

3.4 大气成分分布的测定

除了测定污染物总量或大气中一般的成分外,知道它们的水平或垂直分布,也是十分重要的;此外,气象学家认为,温度、气压、湿度和风矢量的垂直(分布)廓线都是很重要的。接触法依然是这些测量的主要方法(各种成分测定的气体取样,用温度、气压、湿度和风矢量观测的无线电探空测风气球),但由于这种方法非常繁杂,结果促使了遥感手段的发展。由于遥感手段无论在时间上,还是空间上,都能提供巨大的覆盖,这就减少了每次观测的成本,因而使卫星和飞机变成了非常好的用来进行遥感观测的平台。

一般,沿着光学仪器视准轴的分辨率要求是一种主动发射脉冲能量的系统,通过反射或散射回波,去分析反射介质的特征。在脉冲发射和回波反射之间经过的时间就能给出其范围或距离信息。雷达和激光雷达就是这样一些主动式系统的例子。

主动遥感系统既大又笨重,与被动系统相比较还需要一个大的电源,因此,被动系统特别受到重视,尤其对卫星应用来说,空间、电源和重量都是十分有限的。当从低气压一侧观测时,利用指数气体具有的唯一的辐射特征,使用被动观测可产生分布状况的信息。其结果是非常成功的,以致于目前正把这种业务系统安装在卫星上。

3.4.1 温度(分布)廓线的测定

遥感的功效最引人注目的证据是可以从卫星上测定大气温度(分布)廓线。这一技术已经在美国海洋大气局的美国国家环境卫星局1972年发射的卫星上采用了,它们曾通过在雨云-3和雨云-4研究性空间飞行器上使用的五种不同仪器得到验证。卫星能提供全球覆盖,而以前的无线电探空测风站网则是不行的,后者对稠密的居住区是非常适宜的,但对海洋和偏僻的人烟稀少的地方则很难胜任。

这一技术是卡普兰(Kaplan)1959年首先提出的,它涉及到选择几个谱段来测量大气的发射辐射。按这样一种方式来选择,即根据选择变化的不透明性,接受到的能量就为来自不同长度路径上的积分。由于发射的能量是温度和浓度的函数,所以波长的谱段必须选择得要确保能观测来自已知浓度的大气成分的发射辐射; CO_2 已经普遍用于这个目的(用被动式微波辐射计,在60千兆赫范围观测到的大气中的氧气,对于这种用途是很有希望的,并且已在雨云-5空间飞行器上进行了试验,详见第五章)。

3.5 大气成分浓度的测定

前面已谈到,如果已知辐射气体的分布,用辐射传输方程就可求解出温度(分布)廓线;或反过来,如果已知温度(分布)廓线,就可求解出气体的浓度(分布)廓线。在确定浓度(分布)廓线时,在数学运算上不如温度(分布)廓线那么准确,但由于目前作了大量的研究,已经发表了大气组成的(分布)廓线^[29]。

3.5.1 根据辐射率求得垂直浓度(分布)廓线

图21-3示出了由红外干涉光谱仪(IRIS)得到的相对湿度(分布)廓线与离直布罗陀北点(North Point, Gibraltar)最近的无线电探空测量的比较结果。由辐射率求得的(温度和组成)(分布)廓线的特点是它们给出精细结构的能力是有限的。只有当带权函数峰值更陡、数量增加更快(直到某一点)时,分辨率才能提高。但是峰值的锐度不能超过单色的带权函数(Abel et al, 1970)。从图21-3还能明显看出,不可能得到湿度(分布)廓线的精细结构。图21-4a是在地中海上空由红外干涉光谱仪得到的臭氧(分布)廓线,这条廓线不是独自测得的,但可以用它进行比较。它可以与该纬度和季节的平均臭氧(分布)廓线相比较。

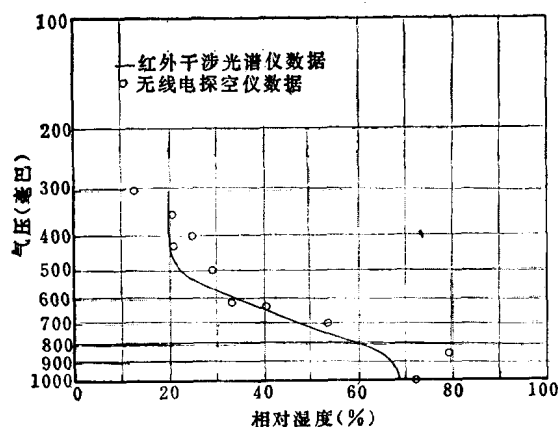


图21-3 大气相对湿度(分布)廓线, 雨云-4卫星红外干涉光谱仪与无线电探空测量数据的比较(卫星数据取自1970年4月10日格林威治平时11点35分的数据, 无线电探空仪数据取自直布罗陀北点格林威治平时12点的数据)

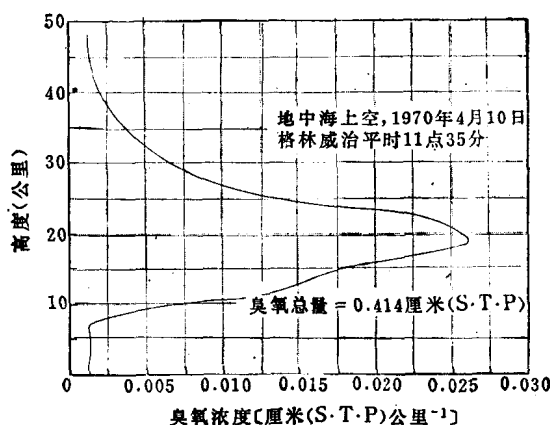


图21-4a 大气臭氧(分布)廓线, 雨云-4卫星红外干涉光谱仪与无线电探空仪测量数据的比较

3.5.2 根据光谱测量求得垂直浓度(分布)廓线

根据地球临边的透射光谱测量(见图21-2), 并且根据一种卷入吸收气体而改变的