

Laser and the Earth



激光与地球

雷仕湛 闫海生 薛慧彬 沈力 编著



上海科学技术出版社
SHANGHAI SCIENTIFIC, TECHNICAL AND CULTURAL PUBLISHERS

激光与地球

雷仕湛 闫海生 编著
薛慧彬 沈 力

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

激光与地球 / 雷仕湛等编著. —上海: 上海科学技术出版社, 2020.1

ISBN 978-7-5478-4590-5

I. ①激… II. ①雷… III. ①激光探测 IV.
①TN247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 196160 号

激光与地球

雷仕湛 闫海生 薛慧彬 沈力 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 22.25

字数 350 千字

2020 年 1 月第 1 版 2020 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-4590-5/N·185

定价: 78.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题, 请向工厂联系调换



序

地球，是我们共同的家园。我们都希望在这里生活得安详、幸福。

然而，地球家园的生态环境正面临来自自然界和人类社会活动两方面的挑战：一方面，作为自然界的一员，地球自身处于发生、发展和不断运动演化的历程之中，发生地震、火山爆发、滑坡或者冰川消长等沧海桑田式变迁，这些自然运动过程紧密关联着地球上的地质、气候和生态环境的演变；另一方面，地球还受到人类社会活动的影响，工业化进程在创造前所未有的物质财富的同时，也带来了难以弥补的生态创伤和环境恶化。如何应对这些挑战，需要多学科、多方位、全球化的协同努力来解决。

雷仕湛等作者，正是从这一初衷出发，编写了《激光与地球》一书，通过采用激光技术来探测地球、认识地球、治理环境和开发资源等。全书共分4章，系统而详尽地介绍了激光探测的技术和原理；科学而又通俗易懂地阐述了探测的结果和应用。

《激光与地球》一书表明：借助激光技术，能够探测并了解地球的自然属性和社会属性，并为保护生态环境提供科学治理的依据；借助激光技术，能够开发和利用太空资源、海洋资源、信息资源和食品资源等，从而实现经济社会发展和生态环境保护协同共进，为建设美丽家园做出贡献！

愿激光让地球更美好，让生活更美好！



中国工程院院士



前 言

20世纪60年代末,宇航员拍摄了太空星球的照片,太空中一颗美丽的蓝色星球——地球,就是人类共同的家园。地球像母亲一样,对人类温柔以待,为人类生命活动提供了必需的生活环境和各种资源,滋养我们繁衍生息。

然而,斗转星移,随着人类社会的不断繁荣,我们常常感觉生活环境变差了。天空不再总是湛蓝,不时变得灰蒙蒙的;天气也不时变得酷热、严寒或飓风暴雨;野生物种不断减少,许多生物种类永远消逝。此外,地球上的水资源、矿产资源、能源资源、食物(包括粮食、鱼类等)也出现短缺现象,情况令人担忧。这些问题引起了世界各国的高度关注,很多国家组织科学家进行研究分析,以期找出产生这些问题的根源以及改变这种状况的办法。科学家认为,引起生活环境变化有自然因素和人为因素。现在普遍认为温室效应和地球自转速度变化是引起气候变化的根源,其中又以人为因素造成的地球自转速度变化为主。

随着社会发展和世界人口的增多,各种资源的消耗量也随之增多,而地球陆地上储存的资源数量是有限的,随之而来必然会出现资源短缺。解决途径是开拓新资源,主要是开发利用太空资源和海洋资源。

激光,并不是自然界里原本就存在的,它是凝结人类智慧的伟大发明。激光是人类认识和改造周围世界的神奇工具。利用激光技术可以帮助我们了解天气变差的原因,协助我们找到阻止其变差的办法;利用激光技术可以探测太空、海洋,那里有各种各样丰富的资源,可以解决资源缺乏;利用激光技术也能够培育各种粮食作物、经济作物新品种,它们的产量高,品质优良,给人类提供充足的食物。正如范滇元院士在本书序言中所说的,激光技术在太空资源、海洋资源、信息资源和食品资源等方面将发挥重要的作用,这也是激光技术的一个

重要应用领域。

感谢各位同仁和朋友在本书编写过程中给予的支持和帮助,感谢范滇元院士为本书作序;感谢王晓峰、石江波对本书图片绘制的帮助。希望读者通过本书对我们的地球家园多一些了解,也对未来建设好她有所帮助。诚然,受限于作者的科技知识水平,本书内容可能未达到我们的初衷,也可能离读者的期望有一定距离。我们欢迎并希望读者批评指正,也期待有更好的同类书出版。希望我们每一个人在地球家园都生活得安详、幸福。



目 录

第一章 激光监测地球空间	1
第一节 激光测报地球气候变化	1
一、激光解密气候变化.....	2
二、激光探测大气环境质量	21
第二节 激光开发利用太空资源	45
一、丰富的太空资源	45
二、激光分析监测太空资源和原位制造	62
三、太空激光通信	73
四、激光飞行器	78
参考文献	90
第二章 激光监测海洋	91
第一节 激光监测海洋环境	91
一、激光监测海洋水文环境	91
二、激光监测海洋气候环境.....	106
三、激光探测海洋地理环境.....	110
四、激光探测海洋光学环境.....	118
五、激光监测海洋电磁场.....	127
六、激光监测海洋环境噪声.....	130
七、激光监测海洋环境污染.....	135
第二节 激光监测海洋资源	148

一、海洋矿产资源	148
二、海洋生物资源	154
三、激光探测海洋能源资源	159
四、激光探测海洋水资源和化学原料资源	176
第三节 激光海洋水下通信	190
一、海洋光信道特性	190
二、海洋水下激光通信系统和特性	194
三、海洋对潜激光通信	202
参考文献	204
第三章 激光监测地球运动	208
第一节 激光监测地球自转运动	208
一、地球的自转运动	208
二、地球自转速度变化与自然灾害	218
三、导致地球自转速度变化的主要因素	231
第二节 激光监测地球板块运动	234
一、地球板块构造	235
二、地球板块运动	238
第三节 激光监测地球其他运动	243
一、激光监测地极移动	244
二、激光探测地球膨胀运动	247
三、激光探测地心运动	250
四、激光探测火山活动	252
参考文献	261
第四章 激光构建幸福地球家园	264
第一节 激光照射诱变培育生物新品种	264
一、激光照射诱变	265
二、激光照射诱变培育粮食作物新品种	272
三、激光照射诱变培育经济作物新品种	281

	四、激光照射诱变培育鱼类新品种.....	290
第二节	激光重构细胞培育生物新品种	291
	一、激光细胞融合.....	291
	二、激光细胞外源基因导入.....	294
	三、激光“变动”细胞内部组成.....	296
	四、主要技术支撑.....	300
	五、培育生物新品种实例.....	314
第三节	激光照射诱变培育果树新品种	318
	一、激光照射诱变培育水蜜桃新品种.....	319
	二、激光照射诱变培育葡萄新品种.....	320
	三、激光照射诱变培育沙田柚新品种.....	321
第四节	激光照射诱变培育微生物新品种	322
	一、影响激光诱发微生物变异的因素.....	323
	二、激光照射诱变培育微生物新品种实例.....	324
第五节	激光信息高速公路	326
	一、光纤通信.....	327
	二、激光信息存储.....	333
	参考文献	345



第一章

激光监测地球空间

监测预报地球空间气候变化、开发地球空间资源,对人类生产建设和提高生活质量意义重大,激光技术在这些监测工作中起着越来越重要的作用。

第一节 激光测报地球气候变化

地球的周围包裹着厚厚的大气,它是地球生物的保护层。大气层阻挡了空间外来的各种射线,避免它们对地球生物产生危害;大气层也是保温层,使地球表面的温度昼夜变化不至于太大,人类能够在比较舒适的环境中生活。大气也为生命活动提供保障,它提供了维持生命活动所需要的气体(如氧气等)。所以,地球生物离不开大气。然而,大气有时也会“发脾气”、“发怒”,它会给地球带来灾害。掀刮起的飓风、龙卷风横扫地球,哪怕是树木、高楼大厦也可能随风倒下;大气引起的狂风暴雨,会淹没农田庄稼、冲垮堤坝道路,毁坏我们的家园。地球为何会“发怒”?知道它的秘密就可以预测它的发生,预先采取一些办法控制其“发怒”,或制定防备措施进行避险,降低其引发灾害的严重性,减少我们遭受的损失。比如探知将出现大风大雨,或者大雾天气,在码头的轮船便不出港;在海上航行的轮船赶紧回港;在机场的飞机停止出港;已经在空中飞行的飞机改地方赶紧着陆等,这样一来可以避免发生严重的海难或者空难事件。气候变化是自

然现象,目前人类还没有能力阻止它发生,但是,可以根据大气出现的某些现象,预先推测气候将会出现的变化。激光技术就能胜任这种预测工作。

一、激光解密气候变化

(一) 气象要素

气象要素是影响气候变化的气象变量,它包括大气气压、温度、湿度、风速和云等,它们决定着天气是变好还是变坏。

1. 大气气压

这里指的是地面气压,它表示地面单位面积上空整个大气层的总质量。因为除了在对流云中,大气在垂直方向都处于静力学平衡状态,所以真空水银气压表中水银柱的质量就等于大气柱的质量,气压的计量单位是帕斯卡(Pa)。最常使用的是海平面气压,在海平面的大气气压约为760 mm高的水银柱重量,即约1 000 Pa。在海拔高的地面其气压是低于海拔低的地面的,因此要比较不同气象站的大气气压高低,就需要先将该地面的气压校正成海平面气压,校正的方法是加上该地面到海平面的气柱重量。计算这个虚拟气柱的重量时需要假设气柱的温度就是地面温度,因此,校正出来的海平面气压会偏高,尤其是冬季海拔较高的测站,例如冬季蒙古高原常出现海平面气压偏高的情况。

大气的总重量与空气的密度有关,在温度低时空气密度大,气柱的总重量就高,反之亦然。同样道理,气压水平梯度的大小和温度水平梯度也密切相关,大气气压升高表示整个大气层中有冷空气活动,比较冷的空气将代替原来比较温暖的空气。空中的气压在天气分析中通常用等压面高度来表示,等压面的高度高,表示相应等高面上的气压高。

气压和天气状况之间存在着密切的关系,气压的变化可以直接引起天气变化,例如一般高气压对应着晴天,低气压对应着阴雨天气。因此,气压表在国外又有“晴雨表”之称。

2. 大气温度

在分析天气时需要随时仔细观察气温的分布和变化。这里说的气温是指大气的温度,即在地面气象观测规定高度(其值为1.25~2.00 m,我国定为1.5 m)

上的空气温度,它是一个容易受各种因素影响的气象要素。除了大尺度大气过程引起温度变化外,太阳的短波长辐射和长波辐射也使气温出现明显的日变化;天空云量、地面风速大小也会显著改变气温的日变化。

在天气分析中,温度的物理意义有两个:一是质量,二是能量。质量是指单位大气体积的质量,即空气密度(ρ)。因为根据气体状态方程:

$$P = \rho RT$$

式中, P 是大气气压, R 是气体常数。等压面上气压 P 是常数,因此从大气的温度分布就可知大气的密度分布,即大气质量分布。与大气的气压不同的是,从温度可知三维空间中每一个点的质量(单位体积的质量,即密度),而气压则代表垂直方向一定体积的总质量。正因为两者都和温度有关,所以大气的气压分布和变化与气温的分布和变化之间有着密切关系。

气温另一个重要意义是能量,即大气的热能,它是大气运动的能量来源。气温高表示能量高,气温低表示能量低。气温随高度递减,每升高 1 000 m 温度降低 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以高空的温度比地面要低得多。天气预报中最关注的是低空的气温,特别是 1 km 以下最靠近地面的边界层内的气温。

3. 大气湿度

湿度是表示空气中水汽含量或空气干湿程度的物理量,它也是决定云、雾、雨、雪等天气现象的重要因素。从大气环流的角度看,湿度的重要性也是显然的,因为大气运动所依赖的太阳光能量有超过 $1/3$ 是通过水汽间接获得的。此外,水汽也是发生大气对流的根本原因,因为对流所依靠的浮力是由于水汽凝结释放的潜热,才使得云内的温度高于环境的温度。

湿度包括两个不同的内容:一个是绝对湿度,它表征空气中包含的水汽质量;另一个是相对湿度,它表征空气接近饱和的程度。两者虽有联系,但性质不同,使用时需要注意区分。

1) 比湿

比湿(q)是绝对湿度的常用单位,其定义是 1 000 g 湿空气中所含的水汽质量,所以它的单位是 g/kg。水汽在大气中不是独立存在的,它总是和其他空气成分(即干空气)混合在一起。水汽在整个空气质量中只占极少一部分,最多时也只占 2%(即 20 g/kg)左右,少时几乎为零。

平流层中的水汽极度稀少,几乎为零,故它被称为痕量气体。对流层中的水汽随离开地面的高度按指数减少,据估计,500 hPa 以上对流层上半部的水汽只占水汽总量的 7% 左右,即绝大部分的水汽(约 93%)都在对流层的下半部,最大的比湿位于 850 hPa 以下的边界层。

2) 露点温度

比湿的优点是物理概念明确,而且在干绝热过程中保持不变,即具有守恒性。露点温度变化往往反映局地气团性质的变化,这一特点在单测站要素分析中非常有用。常规天气分析中用露点温度(T_d)表示绝对湿度,它是湿空气的温度下降到开始有露凝结生成时的温度,所以它的优点是比较直观。与露点温度相对应的比湿是饱和比湿,即一定温度下空气中可以容留的最大水汽质量,温度越高,饱和比湿越大。

根据天气图上的露点温度,可以在 $T - \ln P$ 图上的等饱和比湿线上很方便地查到相应的比湿值。当空气中水汽很少时,温度必须降得非常低才会达到饱和而凝结,所以露点温度可以非常低,这是因为空气中的水汽来源于海洋,海面的温度决定了海洋面空气的饱和比湿,即使是夏季热带的海洋面,温度最高也只有 29 °C 左右。

3) 相对湿度

它是表示湿空气接近饱和程度的物理量。在一定的大气温度和气压条件下,单位质量空气中所能包含的最大水汽质量称为饱和比湿(用 q_s 表示),如果水汽质量超过它就会出现凝结现象。实际的比湿和该温度下的饱和比湿的比值称为相对湿度(RH),用百分数表示。相对湿度也可用温度与露点的差($T - T_d$)表示,饱和时的温度就是露点温度,即 $T = T_d$,因此 $T - T_d = 0$ 就表示达到饱和,而 $T - T_d$ 越小表示空气越接近饱和。由于在大气探测时湿度观测的误差一般比较大,因此,在天气分析中很少看到 $T - T_d = 0$ 的情况。

相对湿度与露点温度不同,它有很明显的日变化,呈现出与温度日变化反相位的特征。所以,相对湿度的变化不能反映气团性质的变化。但相对湿度也有一个很突出的优点,就是对大气垂直运动非常敏感。如果大气出现上升运动,哪怕相当微弱的运动,都会使相对湿度出现显著升高(达 70%);反之,如果出现下沉运动,则由于绝热压缩温度升高而使相对湿度显著降低(达 30%)。由于大气做垂直运动是天气分析中最难掌握的,所以相对湿度值得总结和应用。

4. 风速

风速也是气候学的重要参数之一,准确测量风速对数值天气预报、季节到年度气候预报和大气动力学、热力学研究以及与全球气候状态有关的水、化学和气溶胶圈的研究都非常重要。此外,准确实时的风场数据可为航空器、航天飞机的起飞和着陆提供安全保障,可提高导弹轨道预测的准确性,对军事活动等方面也都具有重要意义。

在天气学中,风速是专指空气的大规模水平运动速度。空气大规模运动中的垂直运动分量非常小(量级为 10^{-2} m/s),大约只有水平运动分量的千分之一,不是常规测量仪器能直接测量的,所以天气学中的风速不包括空气垂直运动速度。

5. 云

云是发生在高空的水汽凝结现象,由悬浮在大气中的微小水滴、冰晶微粒或两者混合的可见聚合物组成,其底部处于地面之上,全球平均有超过 60% 的地区被云覆盖。常规气象观察用到云的主要要素有云量、云状和云高。

1) 云的作用

云是影响天气的重要因素之一。云层相当于能量的媒介,云的存在能够影响大气中辐射能量(如太阳光辐射能量)的传输,从而改变辐射能量的时空分布;同时,云还通过参与水循环过程,改变地球上空水的分布状况。此外,云层也在地球与太空之间充当了“守门员”的角色,它通过吸收和释放大气中的能量帮助调节全球气温。云也具有“太阳伞”的作用和温室效应作用。云的生成、外形特征、云量多少、分布及演变等,不仅反映了当时大气的运动、稳定程度和水汽状况等,也是预示未来天气变化的重要征兆之一。因此,正确观测分析云的变化,是了解、认识大气物理状况,掌握天气变化规律的一个重要手段。然而,云也是全球气候模型中最难确定的气象要素之一,因此,对云的探测显得特别重要。激光测云是依据大气散射理论和激光雷达原理发展起来的一种新型的云层探测方法,它在测量云底高、云的厚度等方面有独特的优点,它的测量范围宽、测量精度高、稳定性好。利用激光还可以探测云体的演变、云中空间和时间不均匀结构,便于研究云中湍流状况、云的微观变化、人工怎样影响天气等。

2) 云量

云量是指云遮蔽天空视野的成数,包括总云量和低云量。总云量指观测时天空被所有的云遮蔽的总成数,低云量是指天空被低云所遮蔽的成数。对云量

的观测在天气预报中很重要,根据云量的多少可以确定是晴天、少云天气、多云天气还是阴天等天气状况。世界气象组织(WMO)对云量的报道有严格的标准,由一种特定类型的云(部分云量)或全部类型的云(总云量)覆盖天空的成数就可以估计云量,在这两者任何一种情况下,以最接近的八分量(八分之一)估算(我国采用十分量),并按最接近的八分量的标度来报告。

3) 云状

云的外形千变万化,云的种类繁多,形状千姿百态,每块云中的云滴尺度、浓度和含水量不同,形成原因也各不相同。云状的判断主要根据空中云的外形特征、结构、色泽、排列、高度以及随之出现的天气现象,经过认真细致的分析作出判定。现在,按云的底部高度把云分为低、中、高3族,然后按云的外形特征、结构特点和成因,把云划分为10大标准云属:卷云、卷积云、卷层云(属高云族),高积云、高层云、雨层云(属中云族),层积云、积云、积雨云及层云(属低云族)。

4) 云高

云高是指自测站地平面至云底的垂直距离,通常以米为单位。云垂直分布在从地面到大约20 km的高空中,依据纬度的不同,各类云层的高度分布也不一样,中纬度地区的高层云分布在5~13 km高度上,中层云分布在2~7 km高度上,而低层云则分布在0~2 km高度上。不同云高在天气变化中所起的作用不同;中层云和低层云由于云顶对太阳光辐射具有较强的反射而使大气和地表降温;而高层云则相反,由于它对太阳光辐射的透射效应以及云体发射红外辐射效应,将使得大气温度、地表温度升高。

(二) 激光探测气象要素

气象要素与天气变化有密切关系,气象要素发生什么样的变化,将预示着天气将发生什么样的变化。气象学家的研究结果显示,气象要素变化与灾害天气(如暴雨、冰雹、冻雨、寒潮和冰雪冻等)有着密切的关系,于是,通过密切监测地面气象要素的变化,便可以预测灾害性天气。例如,以发生暴雨来说,当某日14时温度较前一日下降($\geq 4^{\circ}\text{C}$)且持续下降时,有利于暴雨的形成;当某日14时气压较前一日下降($\geq 1\text{hPa}$)且持续下降时,有利于暴雨的形成;由于前期湿度较低($< 50\%$),当某日14时相对湿度较前一日增大($\geq 30\%$),达到90%以上时,有利于暴雨的形成。

雷暴产生之前,测站一般为暖湿空气所盘踞,气温高、湿度大、风力微弱、天气闷热。雷暴来临时,积雨中下沉的冷空气代替了原来的暖湿空气,气温开始下降,1~2 min 或更短时间内风向急转,风速突然增大,阵风风速常在 20 m/s,有时还可以达到 25 m/s 或以上。

冰雹的产生一般需要强对流天气作为基础,并具备降雹的天气条件:如前期水汽充沛,相对湿度比较大;气压波动较大,露点温度在 0 °C 上下变化较大;锋面云系扰动剧烈,云层由稳定变成不稳定,云体内释放出强烈电流以及具备充分的降水动力并伴有雷雨出现等。

水汽云图反映了大气中上层的水汽分布,水汽云图上水汽区的活动、干湿区边界、暗区等都与暴雨的发生有密切的关系,当该地区水汽云图上出现大片的黑暗下沉运动区时,当地便可能出现暴雨天气;在水汽云图上湿区边界容易产生暴雨天气;在水汽云图水汽输送带高湿区出现亮点对流云时,对应区域可能会出现局部的暴雨天气。

利用激光技术能够实时、准确地了解并测量各个气象要素及它们出现的变化将会给天气带来什么样的影响。

1. 探测信号源

激光技术用以探测气象要素的信号源是激光束在大气中传播时产生的后向激光散射回波。光束在大气中传播时除了发生大气光学吸收以外,还会发生大气光学散射现象,它是光与物质相互作用的重要现象之一,科学家很早便开始研究这种光学现象。这个现象是光束在传播路径上受到一些散射中心的作用,部分光束将偏离原来的传播方向并分散传播,此时从光束传播路径侧向也可以看到光线。光束被散射中心散射的这部分光称为散射光,散射中心可以是大气中的尘埃、颗粒,大气原子、分子等。光学散射现象并不罕见,当避开太阳朝天空张望时,看到蔚蓝的天空就是太阳光穿越地球周围的大气时向四面八方发生散射,以致在各个方向都有太阳光射入我们眼帘(见图 1-1)的结果。如果没有光学散射现象,所能看到的就是另外一种景象:黑暗的星际空间,或者是来自某个遥远星辰的亮光。

根据散射的光波长与散射中心尺寸之间的关系,科学家将光学散射现象分为弹性散射和非弹性散射两大类。弹性散射包含瑞利(Rayleigh)散射、米氏(Mie)散射;非弹性散射则有拉曼(Raman)散射、布里渊散射等。



图 1-1 光学散射使天空明亮

2. 激光雷达

激光雷达广泛应用于对大气、海洋、陆地和其他目标的遥感探测,它具有很高的空间、时间分辨率和探测灵敏度,其用于气象探测的工作原理主要是基于激光大气散射光获得探测信息。向大气发射激光束,其在传播过程中遇到大气分子以及诸如烟、尘、云雾之类的气溶胶粒子时,将发生弹性散射、非弹性散射等,通过探测它们可以获得大气的消光系数及后向散射系数,由它们便可以获得大气气溶胶模式、大气能见度、大气悬浮颗粒特征、浮云状物结构、大气中臭氧和水蒸气等微量气体分布、对流层气体特征以及大气密度和温度等信息。

激光雷达与传统微波雷达的工作原理基本相同,只不过传统雷达是以微波和毫米波作为载波,而激光雷达是以光波为载波,但它们在本质上都属于电磁波。不过,光波频率比微波高三四个数量级,根据电磁波通信理论,激光传递的信息量将会比微波高许多;其次,激光束在空间的发散角比微波束窄得多,这意味着激光束的空间分辨率比微波束高许多。

图 1-2 为激光雷达系统组成框图,它主要由激光发射系统、激光接收系统、信息处理系统和显示系统等组成。雷达工作时,激光发射系统通过光学系统向