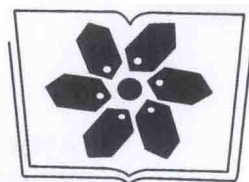


水文遥感

刘元波
吴桂平 等 著
柯长青



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

水文遥感

刘元波 吴桂平 柯长青 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书基于卫星组网和虚拟星座等定量遥感研究的先进思想,结合当代水文遥感相关分支领域的最新研究进展,力求严谨、准确、系统、全面地总结归纳当前水文遥感的基本理论、方法及应用成果。本书在概述水文遥感的基本概念和发展过程及趋势的基础上,以大气水分、陆地水体、土壤水分、冰川积雪、降水和蒸散、海洋水体等地球水循环组分或要素为经,以基本原理、遥感方法、数据产品和实际应用这一逻辑结构为纬,力争系统地阐述地球水循环要素的物理基础、关键水文参数的定量遥感反演方法、遥感反演结果的精度检验方法、遥感反演的全球产品数据及其应用研究案例。

本书有助于相关人员认识了解水文遥感概貌,可为具有气象气候、水文水利、水土资源、生态环境、遥感科学等专业背景的科研人员以及大专院校的本科生和研究生,以及水文、气象、农业、林业、水利和环保等行业部门的专业人员和业务管理人员等提供有益的参考。

图书在版编目(CIP)数据

水文遥感/刘元波等著. —北京: 科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-049302-6

I. ①水… II. ①刘… III. ①遥感技术-应用-水文学 IV. ①P33-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第156730号

责任编辑: 胡 凯 王腾飞/责任校对: 张怡君

责任印制: 张 倩/封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年7月第一次印刷 印张: 38 1/4

字数: 920 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

人类赖以生存的地球是一个由大气圈、水圈、生物圈、岩土圈和人类圈组成的复杂巨系统。为了全面而深入地认识地球系统，目前已经建立了以卫星遥感为主体的全球观测系统。由于水圈直接联系着大气圈、岩土圈和生物圈，联系着地表水分和能量平衡，从而影响各种地表过程。20 世纪下半叶，国际上先后发射了多颗卫星，专门用于监测地球水圈的各个组分。随着社会经济等不断地呈现全球化发展趋势，各种大型国际地学研究计划不断推出，包括 2003 年发起的全球地球观测系统国际计划（Global Earth Observation System of Systems, GEOSS）。随着科学与技术的迅速发展，人们对遥感监测的定量化要求也越来越高。传统的单波段、多波段遥感反演，已经向多波段协同反演、全波段遥感反演方向发展。基于卫星遥感的星际组网和虚拟星座的前瞻性理念成为当代遥感科学发展的前沿性指导思想。

水与人类的生存发展密切相关。全球变暖引起的水循环变异和极端水文气候现象变化，成为当前世界最关切的问题之一，而遥感则是反映全球水循环变化过程的一个关键手段。基于遥感的地球水圈研究，已经成为新的探索方式和新的学科生长点。强烈的社会需求和对地观测技术的迅猛发展，极大地推动了水文学与定量遥感的交叉与融合，促进了水文遥感的产生和发展，并使其逐渐走向成熟。国际上不少科研机构在水文遥感领域开展了相关研究，中国诸多高校和科研院所也对水文遥感应用表现出强烈的需求。应科技发展和社会需求，国际上相关学术期刊相继出版了“水文遥感”专刊，有关地球水循环要素的专著也陆续问世。目前有关水文遥感的出版物多为该领域的研究论文集，涉及广泛的研究方向与应用领域。对于初涉这一领域的科研人员而言，很难一瞰全貌并系统掌握水文遥感的基本知识。

本书的特点主要体现在以下 4 个方面：

学术思想：基于卫星组网和虚拟星座等先进对地观测思想，全书贯穿定量反演和误差分析等先进研究方法，总结归纳水文遥感的基本学科内涵，汲取水文遥感的最新发展成果，以期推动气象学、水文学和定量遥感等学科的交叉与有机融合，为地球水循环变化研究等提供最新的学术视野和研究手段。

内容范围：本书在研究对象上涉及从水分子结构，到立地水平、流域尺度，乃至全球，主要内容包括水文遥感的基本概念和原理、观测手段和研究方法、遥感反演产品和应用案例等，涉及大气水分、陆地水体、土壤水分、冰川积雪、降水和蒸散、海洋水体等地球水循环要素，力争全面地反映水文遥感的研究内容及发展趋势。

结构体系：在阐述水文遥感的基本概念及发展过程的基础上，简述地球水循环和定量遥感的基本知识，进而针对大气水分、陆地水体、土壤水分、冰川积雪、降水和蒸散、海洋水体等地球水循环要素，阐述主要水文变量的物理内涵、定量遥感反演方法、精度检验方法和遥感反演产品数据及其应用案例，以向读者提供一个水文遥感的学科概貌。

写作特点：基于当前最新的学术思想，从全球变化和地球水循环的整体角度出发，努力融合当代水文遥感的最新研究成果；力求做到图文并茂，简单明了；引用经典性和代表性参考文献，使知识成果具有可追溯性；注重理论、方法与案例相结合，力图系统地反映地球水循环要素的遥感反演方法及应用案例，刻画水文遥感的基本学科内涵。

全书共分 10 章。第 1 章首先简述了地球表层系统和地球水循环等基本概念，概述了遥感科学、水文学以及水文遥感的历史发展过程，阐述了水文遥感的基本学科内涵以及水文遥感在全球变化研究中的角色。

第 2 章从水的基本物理性质出发，分别针对固、液、气三态水分简述了水的电磁波谱特征；简要介绍了地球水循环要素的定义、分类、特点及其全球分布特征，阐释了地球能水平衡的基本原理及多尺度性，为水文遥感学科提供了水文物理基础。

第 3 章在简述电磁辐射传输基本原理的基础上，概述了大气与地物的基本波谱特征、日-地-星间的辐射传输过程及主导方程；在遥感观测技术分类基础上，简述了与地球水循环要素研究关系密切的主要遥感平台和传感器特性以及卫星组网和虚拟星座思想，为水文遥感学科提供了遥感科学基础。

第 4 章在概述大气水汽相关物理知识的基础上，简述了可见光-近红外、热红外、被动微波、主动微波和激光雷达以及多传感器联合的大气水汽遥感反演方法，然后概述了大气水汽的地基测量方法以及遥感反演精度检验方法，最后介绍了全球大气水汽定量产品以及全球水汽的气候学分布特征和应用案例。

第 5 章在简述陆地液态水体相关物理知识的基础上，针对水域面积、水位、水深、蓄水量等地表水体物理参数，介绍了遥感反演的基本原理和方法，然后概述了这些地表水体参数的地面观测方法以及遥感反演精度检验方法，最后介绍了各参数的实际应用案例。

第 6 章在简述土壤水分物理性质的基础上，介绍了可见光-近红外、热红外、被动微波和主动微波以及多传感器联合的土壤水分遥感反演原理和方法，然后结合土壤水分的地面观测方法，概述遥感反演精度检验方法，最后介绍全球土壤水分产品以及相关的应用案例。

第 7 章首先简述冰雪遥感的物理基础，其次概述基于可见光-近红外、热红外、被动微波、主动微波及多传感器联合的冰雪遥感反演方法，然后结合冰雪的地面观测方法简述了遥感反演精度检验方法，最后介绍了全球冰雪产品及应用案例。

第 8 章首先概述大气降水的相关物理基础，其次简述基于可见光-红外、被动微波、

主动微波及多传感器联合的主要遥感反演方法, 然后结合大气降水的地面测量方法介绍了遥感反演精度检验方法, 最后简述了全球降水遥感产品, 并给出了实际应用案例。

第9章首先简述了地表蒸散的相关物理原理, 其次介绍了基于可见光-近红外、热红外、微波波段及多传感器联合的陆面蒸散遥感反演原理和方法, 以及海洋蒸发的遥感反演原理与方法; 然后, 结合地表蒸散的地面测量方法, 概述遥感反演精度检验方法, 最后简述全球蒸散遥感产品及相关应用案例。

第10章首先简述有关海洋水体的物理基础, 其次介绍主要海洋水文参数的遥感反演方法, 结合海洋水文参数的地面测量方法, 简述遥感反演精度检验方法, 最后介绍全球海洋水体数据集及应用案例。

全书撰写提纲和基本内容, 经刘元波反复思考, 斟酌拟定, 并由数位编委会成员协助完成。第1章、第2章由刘元波撰写, 第3章由刘元波、冯微微、郭瑞芳撰写, 第4章由范兴旺、刘元波、朱亚乔撰写, 第5章由吴桂平、刘元波、郭瑞芳撰写, 第6章由刘元波、冯微微撰写, 第7章由柯长青、徐于月、寇程、金鑫、刘洵、邓娟、章睿、陶安琪、李澜宇、韩艳飞撰写, 第8章由刘元波、郭瑞芳、朱亚乔撰写, 第9章由刘元波、潘鑫撰写, 第10章由吴桂平撰写。全书由刘元波统稿, 部分章节进行了5次修改。

在本书撰写过程中, 自始至终, 受到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所高前兆先生和王介民先生、水利部太湖流域管理局陈荷生先生、中国科学院南京地质古生物研究所唐领余先生的大力支持和热情鼓励。河海大学芮孝芳先生对书稿第1章和第2章提出了富有建设性的修改意见。中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心周世新研究员对书稿第1章提出了修改建议。在科学出版社南京分社的倾力支持下, 在中国科学院地理科学与资源研究所康跃虎研究员和南京大学居为民教授的鼎力推荐下, 本书获得了中国科学院科学出版基金资助。作者对此深表谢意!

本书从起草到提交书稿, 历时5年有余, 先后得到中国科学院百人计划择优支持项目、国家自然科学基金面上项目(41171272)、国家高技术研究发展计划项目(2012AA12A304)、国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417000)、中国科学院南京地理与湖泊研究所一三五战略发展规划重点项目(NIGLAS2012135001)和国家自然科学基金重点项目(41430855、91125004)的联合资助, 在此一并致谢! 在本书出版过程中, 得到了科学出版社南京分社的倾力协助, 并获得了中国科学院科学出版基金项目资助, 在此对科学出版社的编辑表示诚挚谢意!

在作者多年的学术生涯中, 得到了中国科学院南京地理与湖泊研究所、中国科学院遥感与数字地球研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中国科学院青藏高原研究所、中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院植物研究所、中国科学院南京土壤所、中国科学院成都山地灾害与环境研究所、中国科学院成都生物研究所等多家科

研机构,以及南京大学、河海大学、北京师范大学、清华大学、北京大学、华东师范大学、中央民族大学、南京师范大学、中山大学、兰州大学、美国亚利桑那州立大学、日本名古屋大学等多所高校诸位同仁的支持与协助,在此表示衷心的感谢!本书最终能够得以面世,离不开作者背后许许多多默默无闻的无私奉献和深情理解,在此无法一一陈述,作者对此深感歉意。

本书是作者多年从事水文遥感相关研究过程中,对水文遥感不断认识、思考和凝练的结果。虽然作者力争较为全面系统地反映水文遥感的基本内涵及前沿研究动态,但也深知科学总是不断发展的,而自身学识水平有限,纰误难免,恳请读者指正。希望本书的出版,能促进气象学、水文学和定量遥感等学科的有机交融,推动水文遥感这一新兴交叉学科的发展;让更多的科研人员尽早尽快地进入水文遥感领域,促进利用遥感手段开展全球变温背景下地球水循环及水文水资源变化等研究;同时希望本书能起到抛砖引玉的作用,将来能有更为系统完善的水文遥感著作出版问世。

刘元波

二零一五年玖月于南京

ybliu@niglas.ac.cn

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 地球表层系统与对地观测遥感	1
1.1.2 地球水循环与水文学	6
1.2 水文遥感的学科内涵	12
1.2.1 水文遥感的产生与发展	13
1.2.2 水文遥感的基本内容	16
1.2.3 水文遥感的学科特征	19
1.2.4 作为交叉学科的水文遥感	20
1.3 水文遥感与全球气候变化	21
参考文献	22
第 2 章 地球水循环	27
2.1 水的物理特性	27
2.1.1 水的结构与特性	27
2.1.2 水的三态及转化	31
2.1.3 水的电磁波谱特性	32
2.2 地球系统水的分布	35
2.2.1 水的分类	35
2.2.2 各类水的分布	37
2.3 水分循环	42
2.3.1 大气水循环	43
2.3.2 海洋水循环	44
2.3.3 陆地水循环	47
2.4 能水平衡	49
2.4.1 能量平衡	49
2.4.2 水量平衡	53
2.5 本章小结	59
参考文献	59
第 3 章 遥感物理基础	61
3.1 电磁辐射物理基础	61
3.1.1 电磁波与电磁波谱	61
3.1.2 电磁辐射基本度量	66

3.1.3 电磁辐射基本原理	66
3.1.4 电磁辐射传输方程	69
3.2 日-地-星间辐射传输过程	70
3.2.1 太阳辐射	71
3.2.2 大气辐射传输过程	71
3.2.3 地表辐射传输过程	73
3.2.4 地球辐射传输方程	75
3.3 大气与地物的波谱特征	80
3.3.1 主要大气成分的谱线特征	81
3.3.2 典型地物的波谱特征	82
3.3.3 主要的地物波谱数据库	83
3.4 卫星遥感分类	84
3.4.1 紫外遥感	84
3.4.2 可见光-反射红外遥感	86
3.4.3 热红外遥感	90
3.4.4 微波遥感	91
3.5 卫星遥感平台	96
3.5.1 对地静止卫星	97
3.5.2 近地轨道卫星	98
3.6 卫星组网与虚拟星座	103
3.6.1 卫星组网	103
3.6.2 虚拟星座	105
3.7 本章小结	108
参考文献	109
第4章 大气水分遥感	112
4.1 大气水汽的物理基础	113
4.1.1 大气水汽的存在方式与分类	113
4.1.2 大气水汽的基本运动方式与原理	120
4.1.3 大气水汽的度量指标与表示方法	123
4.1.4 大气水汽与电磁波的相互作用特性	125
4.2 大气水汽遥感方法	130
4.2.1 可见光-近红外遥感方法	131
4.2.2 热红外遥感方法	133
4.2.3 被动微波遥感方法	136
4.2.4 主动微波遥感方法	139
4.2.5 激光雷达遥感方法	141
4.2.6 多传感器联合方法	142
4.3 地面观测方法与遥感反演精度检验	144

4.3.1 地面测量方法	145
4.3.2 遥感反演精度检验	150
4.4 全球水汽产品及应用	162
4.4.1 主要大气水汽产品	163
4.4.2 大气水汽产品应用	170
4.5 本章小结	174
参考文献	175
第5章 陆地水体遥感	182
5.1 陆地水体的物理基础	182
5.1.1 陆地水体的存在形式与分布	183
5.1.2 陆地水体的基本运动方式与原理	186
5.1.3 陆地水体的度量指标与表示方法	190
5.1.4 陆地水体与电磁波的相互作用特性	193
5.2 陆地水体参数遥感方法	197
5.2.1 水域面积	197
5.2.2 河湖水位	205
5.2.3 蓄水量	209
5.3 地面测量方法与反演精度检验	214
5.3.1 地面测量方法	214
5.3.2 遥感反演精度检验	219
5.4 全球陆地水体数据集及应用	225
5.4.1 全球陆表水体数据集	226
5.4.2 陆地水体产品应用	230
5.5 本章小结	234
参考文献	235
第6章 土壤水分遥感	244
6.1 土壤水分物理基础	244
6.1.1 土壤水分的存在形式与分类	245
6.1.2 土壤水分的基本运动方式与原理	249
6.1.3 土壤水分的度量指标与表示方法	251
6.1.4 土壤水分与电磁波的相互作用特性	252
6.2 土壤水分遥感方法	263
6.2.1 可见光-近红外遥感方法	264
6.2.2 热红外遥感方法	266
6.2.3 被动微波遥感方法	267
6.2.4 主动微波遥感方法	272
6.2.5 多传感器联合方法	279
6.3 地面观测方法与遥感反演精度检验	282

6.3.1 地面测量方法	282
6.3.2 遥感反演精度检验	284
6.4 全球土壤水分产品及应用	293
6.4.1 全球土壤水分遥感数据集	293
6.4.2 土壤水分产品应用	298
6.5 本章小结	301
参考文献	302
第7章 冰雪遥感	315
7.1 冰雪物理基础	315
7.1.1 冰雪的分类与分布	315
7.1.2 冰雪形成条件与过程	320
7.1.3 冰雪度量指标	322
7.1.4 冰雪与电磁波的相互作用特性	323
7.2 冰雪遥感方法	329
7.2.1 可见光-近红外遥感方法	330
7.2.2 热红外遥感方法	337
7.2.3 被动微波遥感方法	339
7.2.4 主动微波遥感方法	343
7.2.5 多传感器联合方法	350
7.3 地面测量方法与遥感反演精度检验	351
7.3.1 地面测量方法	351
7.3.2 遥感反演精度检验	362
7.4 全球冰雪产品及应用	364
7.4.1 全球冰雪遥感产品	364
7.4.2 冰雪产品应用	369
7.5 本章小结	373
参考文献	375
第8章 降水遥感	382
8.1 降水物理基础	382
8.1.1 降水形成的宏观背景条件	383
8.1.2 降水形成的微观物理过程	383
8.1.3 降水度量指标与表示方法	389
8.1.4 水凝物与电磁波的相互作用	390
8.2 降水遥感方法	400
8.2.1 可见光-红外遥感方法	402
8.2.2 被动微波遥感方法	404
8.2.3 雷达遥感方法	408
8.2.4 多传感器联合方法	409

8.3 地面测量方法与遥感反演精度验证	413
8.3.1 地面测量方法	413
8.3.2 遥感反演精度检验	418
8.4 全球降水产品及应用	426
8.4.1 全球降水遥感产品	426
8.4.2 降水产品应用	432
8.5 本章小结	436
参考文献	437
第9章 地表蒸散遥感	446
9.1 蒸散物理基础	447
9.1.1 地表蒸散的宏观背景	447
9.1.2 蒸散物理过程与原理	450
9.1.3 地表蒸散的度量指标与表示方法	454
9.1.4 电磁波与相关环境要素之间的相互作用特性	455
9.2 蒸散遥感方法	462
9.2.1 可见光-近红外遥感方法	463
9.2.2 热红外遥感方法	465
9.2.3 微波遥感方法	468
9.2.4 多传感器联合方法	469
9.2.5 海洋蒸发遥感方法	476
9.3 地面测量方法与遥感反演精度检验	478
9.3.1 地面测量方法	478
9.3.2 遥感反演精度检验	484
9.4 全球蒸散产品及应用	490
9.4.1 全球蒸散遥感产品	490
9.4.2 蒸散产品应用	497
9.5 本章小结	502
参考文献	503
第10章 海洋水文遥感	518
10.1 海洋水文物理基础	518
10.1.1 海洋水体的分布与特性	519
10.1.2 海洋水体的基本运动方式与原理	523
10.1.3 海洋水体的度量指标与表示方法	526
10.1.4 海洋水体的电磁波谱特性	529
10.2 海洋水文要素遥感方法	534
10.2.1 海水潮位遥感方法	535
10.2.2 海水深度遥感方法	541
10.2.3 海表洋流遥感方法	549

10.2.4 海洋水量变化遥感方法	555
10.3 地面测量方法与遥感反演精度检验	559
10.3.1 地面测量方法	559
10.3.2 遥感反演精度检验	573
10.4 全球海洋水文数据集及应用	576
10.4.1 海面高度产品数据集	576
10.4.2 海洋地形/深度产品数据集	579
10.4.3 海表洋流产品数据集	582
10.4.4 地球重力场产品数据集	585
10.5 本章小结	588
参考文献	589
附录 遥感精度检验评价指标	597

第 1 章 绪 论

水文遥感作为一门相对独立的学科，有其自身特定的研究对象，由一系列的基本概念、基本原理、方法和技术构成。作为一门综合交叉学科，在研究对象、研究内容和研究方法上，与遥感和测绘等信息科学技术及水文学和气象学等地球科学之间存在着千丝万缕的关系。水文遥感的产生与发展，离不开相关学科理论与技术的创新和支撑，反映了当代科学与技术综合发展的内在必然趋势。

本章 1.1 节将概括地介绍地球表层系统的圈层概念和地球水循环的基本组成，及对地观测遥感系统和水文学的发展过程。1.2 节在简要回顾和总结水文遥感的产生与发展过程的基础上，概述水文遥感的基本内容及学科特征。1.3 节结合当前的全球气候变化背景和地球水循环研究的难点与热点问题，简释水文遥感在地球科学研究中的重要角色及理论实践意义。

1.1 基 本 概 念

水文遥感以地球水圈（地球水循环）为研究对象，以遥感传感器为观测手段，从遥感物理和大地测量学的基本原理出发，运用水文学和气象学原理，发展关于地球水循环要素的定量提取或反演的原理、方法和技术，反映地球水循环要素的空间分布和动态变化过程，为区域及全球水循环研究等提供理论、方法和技术支持。

地球水循环是水文遥感的基本研究对象，是地球系统的有机组成部分，与大气圈、水圈、生物圈和岩土圈等地球圈层密切相关。对地观测遥感是水文遥感的最基本观测手段，涉及 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外光与微波，乃至无线电波等各波段的观测方法与技术。由于地球水循环本身涉及多个地球圈层，这里首先简述地球表层系统。

1.1.1 地球表层系统与对地观测遥感

1. 地球表层系统

地球作为一个球体概念出现，可追溯到公元前 3 世纪希腊天文学家和数学家埃拉托色尼的地球半径测量。经过漫长摸索，公元 16 世纪尼古拉·哥白尼（1473~1543 年）提出日心说，艾萨克·牛顿（1643~1727 年）描述了万有引力和三大运动定律，本杰明·富兰克林（1706~1790 年）发现了大气电场和墨西哥湾流，詹姆斯·赫顿（1726~1797 年）提出了地球火成论学说，查尔斯·莱尔（1797~1875 年）提出了地质均变论，查尔斯·达尔文（1809~1882 年）提出了进化论。

在近代数学、物理学和化学发展的基础上，20 世纪的地球科学研究逐步走向量化。随着大气观测的全球化和计算机技术的迅猛发展，人们已经能够进行天气预报。1959 年

国际地球物理年,第一次把地球作为一个有机整体,开展多学科观测与研究,从而大大地推进了关于地球系统的国际合作研究。随着放射年代学的发展,地质学家能够测量长达数十亿年的地球演变历史。另外,人们获得了大陆漂移和地球磁场变化的证据。随着卫星遥感技术的发展,卫星提供了全球的云、风、温等气象要素的观测信息,显著地改善了天气预报的精度。地球概念不再仅仅包括地壳、地幔、地心等静态固体成分,而是与大气和海洋一起构成一个动态系统,海气相互作用研究得到重视,地球气候系统的概念逐步形成(陈泮勤,2003)。1988年,美国国家航空和宇航管理局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)出版了一份关于地球系统概念的详细报告,题为 *Earth System Science: A Closer View*,正式系统地阐述了地球系统和地球系统科学的观点,标志着地球系统概念走向成熟(Earth System Sciences Committee, 1988)。

地球表层系统包括内圈和外圈。内圈包括地幔圈、外核液体圈和内核固体圈。外圈包括大气圈、水圈(含冰冻圈)、生物圈和岩土圈(含土壤圈),即地球表层系统(图 1.1)。地球系统是一个内在具有联系的动力演化系统,贯穿着复杂多样的物理、化学和生物学过程,不同时空尺度的地表动态变化是地球各圈层相互作用的结果(张志强,2005)。20世纪90年代以来,基于人类社会的自然独特性、全球分布规模和日益增强的影响力,人们提出了人类圈的概念,形成地球表层系统的五元结构(陈之荣,1993; Crutzen and Stoermer, 2000; Crutzen, 2002; 陈之荣, 2006; Steffen, et al., 2011)。



图 1.1 地球表层系统示意图

大气圈(atmosphere) 根据 1976 年美国标准大气定义,大气圈是地球外圈中最外的圈层,由氮气(79%)、氧气(20%)、氩(1%)、二氧化碳及其他稀有气体和水汽组成,气体密度随高度增加而趋于稀薄,几乎全部气体都集中在距地球表面 100km 的高度范围内(NOAA, et al., 1976; Fleagle and Businger, 1980)。根据温度、组分和密度等大气物理特征,大气圈自下而上分为对流层(troposphere)、平流层(stratosphere)、中间层(mesosphere)、热成层(thermosphere)和散逸层(exosphere)。对流层厚度约

10~20km。夏季较厚,冬季较薄;低纬度地区较厚,高纬度地区较薄。该层的主要特点包括:气温随高度而降低,每升高1km,温度下降5~6℃;具有强烈的对流运动;集中了大气全部质量的3/4和几乎全部的大气水汽,云、雾、雨、雪等现象都发生在这一层内。平流层位于对流层之上,距地球表面约20~50km,该层特点是没有强烈的垂直对流运动,气流平稳;水汽和尘埃都很少,很少有云出现,大气透明度好。平流层之上为中间层,距地球表面约50~85km,空气非常稀薄,但垂直对流强烈,层顶温度约190K(She, et al., 1993)。热成层在中间层之上,高度可达800km,其主要特征是气温随高度增加而增加,在300km高度处的气温可超过1000℃;由于受到强烈的太阳紫外线和宇宙射线的作用,气体分子处于高度电离状态,故亦称作“电离层”。热成层以上的大气层统称为散逸层,空气极其稀薄,是大气层向星际空间过渡的区域,没有明显的外部边界。在大气圈的五个分层中,与水循环关系最为密切的是对流层和平流层,主要天气现象都发生在对流层内。

水圈(hydrosphere) 水圈是地球外圈中十分活跃的一个圈层,以水的固、液、气三态形式同时存在(Korzun, 1978)。水圈上界可达大气圈的对流层顶部,下界可至岩石圈中深层地下水下限。水圈包括大气中的水汽,陆地和海洋的液态水体,冰川雪盖冻土等固态水体及生物体内的水。地球水体总体积为 $13.86 \times 10^8 \text{ km}^3$ 。其中,绝大多数大气水汽分布在大气圈对流层,主要以气态形式存在,总量约 $1.29 \times 10^4 \text{ km}^3$,占水圈总量不到0.001%。大气水主要来源于海洋和陆地的水体蒸发、植物蒸腾以及火山活动等,其中海洋的水体蒸发比重最大。地球表面的液态水体主要分布在海洋和大陆,海洋水约占95%以上,大陆地表水和地下水约占不到4%。地球表面的固态水体包括冰川、冰盖、雪盖、多年冻土及浮冰等,亦称冰冻圈(cryosphere)。其中,冰冻圈的最大组成部分是雪盖,其中2/3覆盖陆面,1/3覆盖海洋;冰川覆盖着不足10%的地球陆地表面;多年冻土覆盖着北半球24%的陆地表面;浮冰主要包括海冰、湖冰和河冰等。在水圈中,各种水体分布极不均匀,通过能量交换,以降水、蒸散、径流等多种形式进行相互转化,构成大大小小的水循环。与大气圈、生物圈和岩石圈相互作用,并影响地球表层系统的变化过程。

岩土圈(lithosphere) 岩土圈包括岩石圈和土壤圈。岩石圈是指位于地表至上地幔软流层之间、主要由坚硬岩石组成的圈层,包括地壳和上地幔顶部,厚约60~120 km,地壳和地幔之间以莫霍面分界(Jackson, 1998)。地壳是地球表面的构造层,只占地球体积的0.8%,主要由花岗岩、玄武岩和超基性岩组成。岩土圈的主要化学元素包括氧(60.4%)、硅(20.5%)、铝(6.2%)、氢(2.9%)、钠(2.49%)、铁(1.9%)、钙(1.88%)、镁(1.77%)和钾(1.37%)等,其他元素含量都小于1%。根据地球板块构造理论,岩石圈可以分为欧亚板块、太平洋板块、美洲板块、非洲板块、印度洋板块、南极洲板块,以及镶嵌其间的一些小板块。板块边界有三种类型,即离散型、汇聚型和转换断层。另外,地壳亦可分为大陆地壳和大洋地壳,一般而言,大陆地壳厚度要大于大洋地壳厚度。大洋中脊最新生成部分的厚度为6~8 km,最老的部分则有100 km;大陆岩石圈厚度在100~400 km。大陆地壳覆盖地球表面的45%,主要是长英岩石,化学组成以硅铝质为主。大洋地壳主要是橄榄岩,以镁铁质与超镁铁质为主,密度大于大陆地壳。存在于陆地表面和浅水域底部的土壤构成了连续的覆盖层,早在1938年被瑞典学

者 Mattson 称为土壤圈 (pedosphere) (Mattson, 1938; Fortescue, 1980)。土壤圈的平均厚度为 5m, 表面积约为 $1.3 \times 10^8 \text{ km}^2$, 即陆地面积与高山、冰川和地表水体的面积之差。

生物圈 (biosphere) 生物圈是指地球上所有生命活动的领域及其居住环境的整体, 是地球特有的圈层, 也是人类诞生和生存的空间, 早在 1875 年被奥地利地质学家爱德华·休斯 (Eduard Suess, 1831~1914 年) 给出定义 (Smil, 2002)。它的垂直空间范围包括海平面以上 10 km 至海平面以下 10 km 范围, 含大气圈对流层、水圈和岩土圈表层。生物圈为生物生存提供了营养物质、阳光、空气、水、适宜的温度和生存空间, 其中绝大部分生物集中在地表以上 100 m 到水下 100 m 的空间内, 也是大气圈、水圈、岩土圈等交界处。生物圈中存在的各种生物, 从物质和能量流动的角度, 可分为生产者、消费者和分解者。其中, 生产者主要是绿色植物, 它通过光合作用将无机物合成为有机物; 消费者主要是指包括人在内的动物; 分解者主要指微生物, 它将有机物分解为无机物。这三类生物与其所生活的无机环境一起构成生态系统, 并形成生态系统完整的物质和能量流动。生物圈内存在多种多样的生态系统类型, 包括森林生态系统、草地生态系统、湿地生态系统、淡水生态系统、农田生态系统、海洋生态系统和城市生态系统等。

2. 对地观测遥感

遥感是不直接接触物体来识别物体特性的科学与技术。作为一门学科, 遥感科学经历了长期的酝酿和技术积累, 才逐步发展起来。自人类社会伊始, 人们就开始了对日升月落和星转斗移等自然现象以及周围环境与变化的观察与认知。对世界进行全面了解的强烈愿望和需求使得人们不断地进行探索。15~17 世纪的地理大发现时代后, 人们初步获得了对全球的认识。显然, 通过个体感官获知周围环境信息的方式, 不适用于具有时空广延性和动态变化特征的地球表层系统。直至遥感技术的出现, 才使得对地全面观测的希望成为现实。根据遥感的发展历史和形成特征, 可以分为以下 4 个发展阶段。

古代~20 世纪初 最原始的遥感成像当属人眼视觉功能 (Cohen, 2000)。在中国《墨经》(约公元前 388 年) 中, 描述了小孔成像原理。公元 10 世纪, 阿拉伯学者本·海什木 (Ibn al-Haytham, Al Hazen) (965~1040 年) 阐述了暗室成像原理, 即小孔成像原理。1608 年, 德国人汉斯·李波尔 (Hans Lippershey) (1570~1619 年) 制造了第一架望远镜。1826 年, 法国人约瑟夫·尼塞福尔·涅普斯 (Joseph Nicéphore Niepce) (1765~1833 年) 拍摄了世界上最早的照片。1849 年, “摄影测量之父” 法国人克隆内尔·艾米·劳塞达特 (Colonel Aime Laussedat) (1819~1907 年) 进行了摄影测量。1958 年, 法国人加斯帕尔·费利克斯·图尔纳雄 (Gaspard-Félix Tournachon) (1820~1910 年) 用系留在气球上的相机在巴黎上空拍摄了第一张航空照片。随着光谱学知识的不断丰富, 摄影技术和航空技术的不断发展, 航空摄影测量技术亦随之进步。1910 年, 国际摄影测量与遥感学会 (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS) 成立。1913 年, 在维也纳召开第一届国际摄影测量与遥感学会会上, 开普顿·塔迪沃 (Captain Tardivo) 发表论文首次描述了航空摄影测绘问题。

20 世纪初~20 世纪 60 年代 在第一次世界大战和第二次世界大战中, 空中侦察与航片判读水平得到快速提升, 红外和微波技术得到发展和重视。1934 年成立了美国摄影