

刘树华 编著

环境物理学



Chemical Industry Press



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

环境物理学

刘树华 编著



化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

环境物理学/刘树华编著. —北京: 化学工业出版社, 2004
ISBN 7-5025-5809-8

I. 环… II. 刘… III. 环境物理学
IV. X12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 073905 号

环境物理学

刘树华 编著

责任编辑: 刘兴春

责任校对: 陈 静 宋 玮

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 14¼ 字数 369 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5809-8/X·494

定 价: 34.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

随着科学技术和社会生产力的提高,人类创造了前所未有的物质财富。与此同时,随着人口剧增,人类活动强烈地干扰了地球上的自然生态系统,生态环境遭到严重破坏,生态环境系统功能减退,改变了圈层之间和谐的环境物理过程,严重地阻碍着经济的发展和人民生活质量的提高,进而威胁着全人类未来生存环境的安全和可持续发展。

促进人类发展进步,走可持续发展道路,协调人类社会发展与环境的关系,提高环境保护意识,掌握环境物理知识是编写《环境物理学》的动力。该书是在大气科学、物理科学、环境科学、生态科学和生物物理学之间交叉发展起来的知识集成,是研究生物圈、大气圈和人类社会相互作用及可持续发展的环境物理过程和途径的概括。

编者1996年在美国见到 E. Boeker 和 R. Van Grondelle 编著的《环境物理学》(Environmental Physics, 1995)、G. S. Campbell 编著的《环境生物物理导论》(An Introduction to Environmental Biophysics, 1977)、R. J. Hanks 和 G. L. Ashcroft 编著的《应用土壤物理》(Applied Soil Physics, 1980)、J. L. Monteith 编著的《植被与大气》(Vegetation and the Atmosphere, 1975)和 J. L. Monteith 编著的《环境物理原理》(Principles of Environmental Physics, 1973)等著作后很受启发。至今,《环境物理学》在国内尚未看到。在此基础上,结合多年来的科研成果和教学经验,编著了《环境物理学》。但以上著作与本书写作思路截然不同,例如, E. Boeker 和 R. Van Grondelle 编著的《环

境物理学》主要包括了全球气候、地气系统能量输送、环境污染和社会背景及政府行为等，而其他几部专著也由于时代和编著思路的限制，内容较为单一，例如 G. S. Campbell 编著的《环境生物物理导论》只包括了地表与植被的温度、湿度、风速、辐射和热量、质量和动量的输送及动物与环境；R. J. Hanks 和 G. L. Ashcroft 编著的《应用土壤物理》只包括了土壤中水、热输送及土壤-植被-大气之间的关系；J. L. Monteith 编著的《植被与大气》和《环境物理原理》则偏重于植被群落中的辐射输送，动量、物质与热量交换，微气象观测等。而本专著的主要内容包括：环境物理学的基本知识、基本理论；土壤环境物理、植被环境物理、植被冠层中的辐射传输理论、土壤-植被-大气系统环境物理过程、生物物理过程、水文过程及其模型、遥感环境物理学、陆面物理过程及局地气候效应的预测模型等。

在本书的写作过程中，得到了中国科学院地理科学与资源研究所刘昌明院士，于强、张仁华、项月琴、周允华、谢贤群、陈镜明、卢振民、张鸿儒研究员，张永强、徐兴奎博士的大力帮助，并提供了宝贵资料。梁福明博士，刘和平、辛国君、李万彪、赵春生副教授对本书章节的设置提出了许多宝贵意见。蔺洪涛和邓毅同志为本书有关章节的计算插图做了大量工作。在此深表感谢。

为了有助于广大读者阅读时查阅相关文献和深入研究有关内容，在每章后面列出了主要参考文献，并在书中引用时注明了出处。在此特向被引用内容的作者和单位致以深切的谢意。本书引用文献较多，若有遗漏对作者深表歉意。本书是在大气科学国家理科基础科学研究和教学人才培养基地的教学和科研实践中完成的，并得到了该基地的大力支持，在此一并表示感谢。

本书可供从事环境科学、大气科学、生态科学、地理学科及区域与全球变化研究和管理的工作人员参考，也可供高等院校相关专业师生参阅。

由于本书涉及内容广泛，限于知识的深度和广度，不足之处在所难免，诚请广大读者批评指正。

刘树华

2004年5月

内 容 提 要

本书是作者多年来从事土壤-植被-大气系统环境物理过程教学和科研实践的概括总结，主要包括：环境物理学的基本知识、基本理论以及环境物理学的发展方向；土壤环境物理、植被环境物理、植被冠层中的辐射传输、土壤-植被-大气系统环境物理过程及其模型、遥感环境物理学、陆面物理过程及局地气候效应的预测模型等，具有较强的知识性、系统性和应用价值。

本书可供从事环境科学、大气科学、生态科学、地理学科及区域与全球变化研究和管理工作的人员参考，也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教材和参考书。

目 录

1 绪论	1
1.1 环境物理学的定义及与社会、经济发展的关系	1
1.2 环境物理学的产生与发展	3
1.3 环境物理学的研究对象和方法	4
参考文献	4
2 环境物理学概论	6
2.1 大气环境物理学概述	6
2.1.1 地球大气的组成	6
2.1.2 系统及其状态参量	16
2.1.3 分子量与摩尔数	20
2.1.4 理想气体状态方程	24
2.2 大气的垂直分层	28
2.2.1 温度结构分层	29
2.2.2 成分结构分层	31
2.3 大气质量及其垂直分布	31
参考文献	33
3 地球大气系统环境物理学概念	34
3.1 静力平衡时大气所受的力	34
3.1.1 重力	34
3.1.2 气压梯度力及大气静力学方程	36
3.2 大气压力的测高公式	38
3.3 重力位势	39
3.4 匀质大气、等温大气及多元大气中压强随高度的变化	40
3.4.1 匀质大气	40
3.4.2 等温大气	42

3.4.3 多元大气	43
3.5 标准大气模式	44
3.6 空气湿度参数及其表达形式	49
3.6.1 温度与饱和水汽压	49
3.6.2 混合比	50
3.6.3 比湿	50
3.6.4 水汽压	50
3.6.5 绝对湿度	52
3.6.6 相对湿度	52
3.6.7 露点温度 T_d 和霜点温度 T_f	53
3.7 空气湿度饱和度和其表达形式	53
参考文献	55
4 地球系统中辐射能量传输的基本物理定律	56
4.1 太阳-地球-大气环境系统中辐射的物理特征	56
4.2 辐射的物理量	58
4.2.1 辐射通量	58
4.2.2 辐射通量密度	58
4.2.3 辐射亮度	59
4.2.4 辐射光谱	61
4.2.5 辐射源	62
4.2.6 吸收率、反射率和透过率	62
4.2.7 黑体和灰体	63
4.3 辐射的基本物理定律	64
4.3.1 基尔霍夫定律	64
4.3.2 普朗克定律	65
4.3.3 斯蒂芬-玻尔兹曼定律	65
4.3.4 维恩定律	66
4.4 太阳辐射物理特征	68
4.4.1 太阳及日地系统物理参数	68
4.4.2 太阳的能量、温度和热源	69

4.4.3 太阳辐射光谱和太阳常数	72
4.5 地球大气上界的太阳辐射能	74
4.5.1 太阳高度的概念	74
4.5.2 地球大气上界的太阳辐射能	75
4.5.3 日出与日落时刻	76
4.5.4 日出和日落方位角	79
4.6 地球运动与昼夜季节和时间	80
4.6.1 昼夜长短的变化	80
4.6.2 昼夜长短的纬度分布和季节变化	84
4.6.3 地球的季节与五带	87
参考文献	92

5 土壤环境物理

5.1 土壤环境物理特征	93
5.1.1 土壤的热力特征	93
5.1.2 土壤热扩散率的计算方法	108
5.2 土壤热通量的计算方法	115
5.2.1 拉依哈特曼-采金方法	115
5.2.2 调和分析法	117
5.3 土壤的温度特征	119
5.3.1 土壤温度的日变化	119
5.3.2 土壤中的温度梯度	122
5.3.3 土壤温度日变化的数值模拟	122
参考文献	127

6 土壤中水环境物理

6.1 土壤中水环境物理量的一些概念	128
6.2 土壤中水的输送	129
6.2.1 土壤中水的稳态输送	129
6.2.2 土壤中水的瞬态输送	130
6.2.3 土壤中水传导特性	131
6.3 土壤中水量平衡	134

6.3.1	土壤水量平衡模型	134
6.3.2	土壤水量平衡方程	136
6.3.3	土壤水量入渗子模型	136
6.3.4	作物蒸散子模型	137
6.4	土壤植物根系吸水计算及模型	144
6.4.1	根系吸水机理模型	145
6.4.2	半理论半经验的根系吸水机理模型	146
6.4.3	经验根系吸水机理模型	147
6.5	土壤水运动模型	147
6.5.1	数学模型	147
6.5.2	差分格式与求解方法	148
6.5.3	参数的确定方法	150
6.5.4	边界条件的确定方法	151
6.5.5	源汇项的处理	152
	参考文献	152

7 地球表面与大气之间环境物理交换过程 154

7.1	地球表面的辐射交换过程	155
7.1.1	地球表面总辐射的计算	155
7.1.2	地球表面长波有效辐射的计算	158
7.2	地-气之间动量的交换过程	160
7.2.1	涡动相关法计算地-气间动量通量	160
7.2.2	空气动力学法计算地-气间动量通量	161
7.2.3	风速廓线梯度迭代法计算地-气间动量通量	162
7.2.4	整体空气动力学法计算地-气间动量通量	164
7.3	地-气间感热通量的交换过程	165
7.3.1	涡动相关法计算地-气间感热通量	165
7.3.2	波文比-能量平衡 (BREB) 法计算地- 气间感热通量	166
7.3.3	空气动力学法计算地-气间感热通量	168
7.3.4	风速廓线梯度迭代法计算地-气间感热通量	169

7.3.5	整体空气动力学法计算地-气间感热通量	171
7.4	地-气间潜热通量的交换过程	171
7.4.1	涡动相关法计算地-气间潜热通量	171
7.4.2	波文比-能量平衡 (BREB) 法计算地- 气间潜热通量	172
7.4.3	空气动力学法计算地-气间潜热通量	172
7.4.4	风速廓线梯度迭代法计算地-气间潜热通量	173
7.4.5	整体空气动力学法计算地-气间潜热通量	175
7.4.6	利用遥感冠层温度计算地-气间潜热通量	176
	参考文献	182
8	遥感环境物理学	185
8.1	遥感数据的大气校正	185
8.2	地表环境物理参数的反演技术	188
8.2.1	利用遥感技术确定植被指数和植被高度	188
8.2.2	利用遥感技术监测干旱区环境物理的方法	195
8.3	地表反照率的反演技术	199
8.4	地表温度的反演技术	207
8.4.1	分裂窗技术的基本理论	208
8.4.2	下垫面温度的反演	209
8.5	地表土壤湿度的反演方法	213
8.5.1	相对反射率反演土壤湿度方法	213
8.5.2	微分光谱反演土壤湿度方法	214
8.5.3	差分反演土壤湿度方法	214
8.6	大气可降水的反演方法	216
8.6.1	反演方法	217
8.6.2	大气透过率的参数化方法	219
8.7	用近红外通道遥感整层水汽总量	222
8.7.1	基本物理原理	224
8.7.2	误差分析	227
8.8	热惯量法遥感土壤水分方法	229

8.9 作物覆盖下土壤含水量的热红外遥感方法	235
参考文献	238
9 植被冠层中的辐射传输	243
9.1 地形对太阳直接辐射影响的计算	243
9.2 植被冠层内太阳直接辐射透过率的计算	245
9.3 太阳直接辐射透过植被冠层的计算	247
9.4 植被冠层对总辐射的截获量的计算	248
9.5 植被冠层内长波辐射的传输	248
9.5.1 植被冠层向下长波辐射传输	249
9.5.2 植被叶片水平和均匀分布的冠层向下 长波辐射传输	252
9.5.3 植被冠层向上长波辐射的传输	253
9.5.4 植被冠层有效辐射和长波辐射净损耗	256
参考文献	259
10 植被与大气的物质、能量传输与贮存	261
10.1 梯度扩散模式在能量和物质输送中的局限性	261
10.2 高阶闭合模式	264
10.2.1 二阶矩模式	265
10.2.2 二阶矩模式的参数化处理	267
10.2.3 高阶闭合模式	268
10.3 流场轨迹模式	271
10.4 空气动力学传导多层模式	277
10.4.1 动量、感热和潜热参数化	277
10.4.2 风速、温度和比湿的平均值的参数化	278
10.4.3 湍流动能及垂直分量和温度的参数化	278
10.4.4 混合长的参数化	280
10.4.5 在植被冠层内的热输送	281
10.4.6 植被冠层辐射模式	284
10.5 土壤-植被-大气相互作用的环境物理过程	286
10.5.1 土壤层的环境物理过程	287

10.5.2	植被层的环境物理过程	288
10.5.3	大气近地层的环境物理过程	288
10.5.4	地表和植被层热通量和蒸发量的参数化	289
10.6	植被冠层热量贮存模式	292
	参考文献	295

11	生物圈与大气圈物质、能量输送	300
11.1	简单生物圈模型 (SiB) 结构	301
11.1.1	简单生物圈模型 (SiB) 的主要参数、驱动变量和 预测变量	302
11.1.2	简单生物圈模型 (SiB) 的主要控制方程	303
11.2	改进简单生物圈模型 (SiB2)	305
11.2.1	增加了光合作用生理化学模块	306
11.2.2	引入了光合-气孔导度方程, 实现了光合作用与 水汽传输的耦合	306
11.2.3	使用卫星遥感数据描述植被动态参数	307
11.2.4	改进简单生物圈模型 (SiB2) 的控制方程	308
11.3	简单生物圈模型 (SiB) 中存在的问题	310
11.4	植被光合作用、冠层气孔导度和蒸散的 环境物理机理	311
11.4.1	植被冠层和地表能量平衡	312
11.4.2	植被冠层蒸发蒸腾的计算方法	313
11.4.3	土壤-植被-大气系统阻力计算方法	314
11.4.4	植被冠层植物生物物理参数的计算	317
11.5	冠层内部辐射传输	319
11.5.1	辐射传输方程	319
11.5.2	叶角分布函数	321
11.5.3	光合有效辐射的直接和散射辐射的比例	322
11.5.4	冠层总光合速率	323
11.5.5	土壤水分胁迫对冠层总光合速率的影响	324
11.5.6	植物呼吸速率的计算	324

11.5.7 土壤呼吸速率的计算	325
参考文献	327
12 陆面生态系统环境物理过程预测方法	331
12.1 地面温度 T_g 的确定方法	331
12.1.1 多层土壤方法	331
12.1.2 地表能量平衡方程法	332
12.1.3 H_A 强迫法	333
12.1.4 强迫恢复法	334
12.2 地面温度 T_g 的其他近似确定方法和试验结果	335
12.3 土壤含水量的强迫恢复处理	338
12.4 单层植被环境物理过程的参数化	340
参考文献	346
13 土壤-植被-大气系统环境生物物理过程	349
13.1 土壤表面环境生物物理过程	349
13.2 植被冠层环境生物物理过程	355
13.3 阻力系数和空气动力学阻力	358
13.4 表面辐射环境生物物理过程	359
13.5 植被热量和水汽的输送过程	361
13.6 土壤温度的预测	369
13.7 地表水文过程	373
参考文献	376
14 土壤-植被-大气系统水分输送环境物理模式	378
14.1 大气子系统参数化	380
14.1.1 大气动力、热力和水汽基本方程	380
14.1.2 边界层湍流参数化	381
14.2 植被子系统参数化	381
14.3 土壤子系统参数化	383
14.3.1 地表能量参数化	383
14.3.2 土壤含水量和表面湿度参数化	386
14.4 模式的初、边值条件及数据的处理方法	388

14.4.1	数据的处理方法	388
14.4.2	模式的初值条件	388
14.4.3	模式的边界条件	390
14.5	不同植被覆盖度对地表热力平衡的影响	390
14.5.1	地表蒸散的连续变化和逐日变化	390
14.5.2	地表含水量的连续变化和逐日变化	393
14.5.3	地表温度的连续变化和逐日变化	395
14.5.4	地表能量的变化	398
14.6	验证性实验	400
14.6.1	改变冠层风速对蒸腾的影响	400
14.6.2	改变土壤表层含水量 w_s 和土壤净含水量 w_2 对 蒸腾的影响	402
14.6.3	地表含水量饱和时的蒸散变化及地表 含水量变化	404
14.6.4	对 Noilhan 订正的验证	405
	参考文献	408
15	森林植被陆面物理过程及局地环境气候效应	410
15.1	模式介绍	411
15.1.1	大气子系统方程	411
15.1.2	湍流交换系数	412
15.1.3	辐射能量通量	413
15.1.4	植被层子系统	415
15.1.5	土壤子系统	416
15.2	差分格式、边界条件与初条件	419
15.3	森林生态系统环境物理特征	421
15.4	非均匀森林植被陆面物理过程和大气边界层 相互作用及局地气候效应	423
	参考文献	437

1 绪论

1.1 环境物理学的定义及与社会、经济发展的关系

从环境物理学的词义上不难看出，它是由环境科学（Environmental Sciences）和物理学（Physics）发展起来的一门交叉性学科，着重从环境科学与物理学相结合的观点，研究发生在土壤圈、大气圈、水圈、冰雪圈和生物圈中的环境物理现象、规律及其理论，和人类社会相互作用及可持续发展的物理机制与途径。环境物理学与其他交叉学科一样，必然有其科学和社会的发展基础；它是环境问题成为全球性重大问题前提下产生的。环境物理学的提出是科学进步和人类社会发展的必然结果，也是人类对自然现象的本质和变化规律认识深化的体现。

环境是指围绕着生物群的空间，以及其中直接或间接地影响生物生存和发展的各种自然因素和社会因素的总体。环境是人类生存和发展的基础，同时也是人类开发利用的对象。而环境物理是指在环境中发生的一些物理现象，如物质、能量的输送等，它们是人类赖以生存的物质基础。

人类所居住的地球，自内而外呈圈层状结构。与人类关系最为密切的是地表几个圈层，包括岩石圈、大气圈、水圈 3 个基本圈层，及在这 3 个基本圈层相互作用、相互制约、相互渗透、相互转化的交错圈层上又产生了土壤圈和生物圈，它们共同组成了人类的自然环境，为人类的生存和发展提供了基础条件。

人类的生存环境主要是指自然环境中的生物圈这一圈层，它主要位于下起岩石圈表面层，上至大气圈下部的对流层顶。一般包括地表以上 10km 和海洋表面以下 11km 范围。随着科学技术