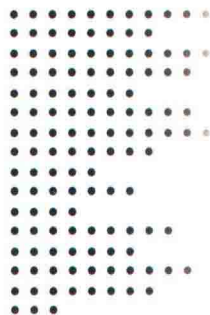
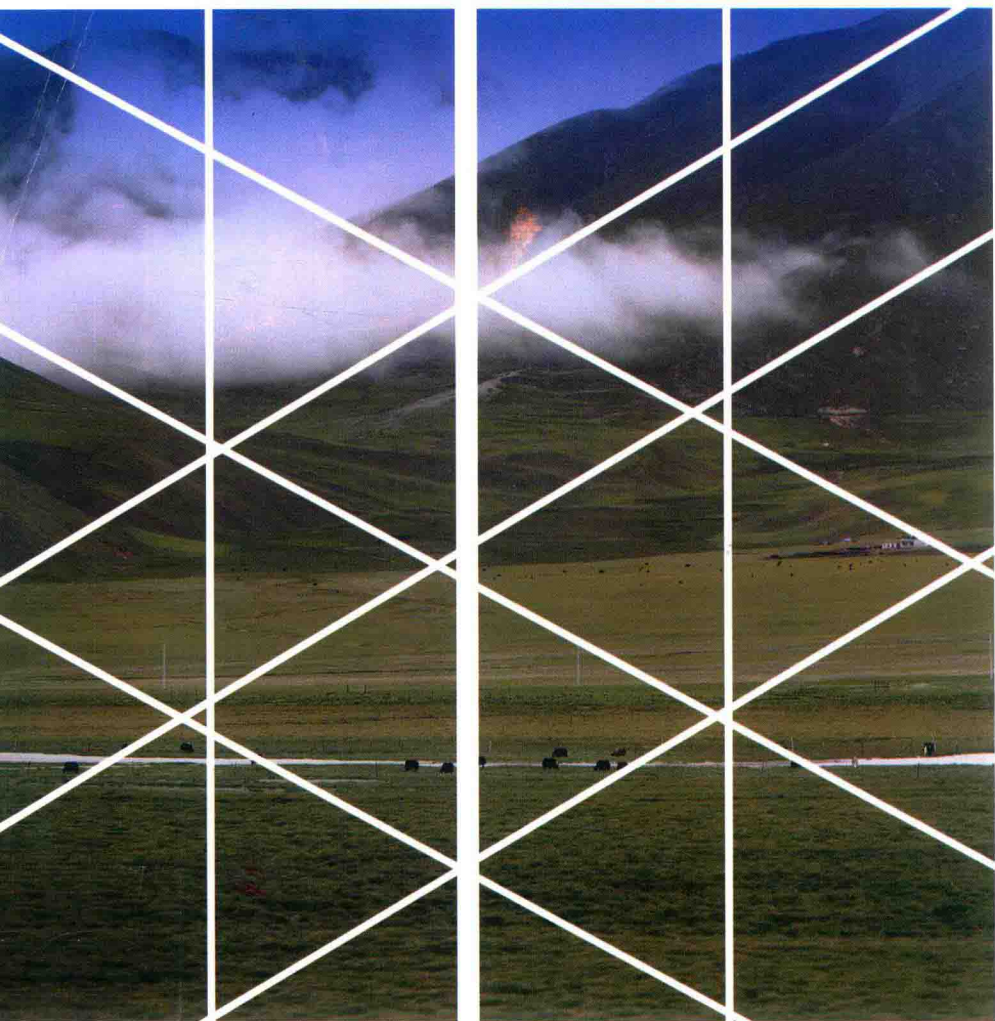




地球信息科学基础丛书

陆地表层系统模型模拟与分析

◎ 陈报章 等 著



科学出版社

地球信息科学基础丛书

陆地表层系统模型模拟与分析

陈报章 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共4篇22章。第一篇主要介绍地球系统模式研究进展与展望,重点分析地球系统模式框架下陆表模块、大气模块、海洋模块及海冰模块间相互作用的原理及耦合方法等;第二篇介绍陆地表层系统模拟的原理与方法,对陆面过程模型各发展阶段有代表性的典型模型进行对比分析,并对模型模拟技术方法进行讨论;第三篇系统地介绍集成陆面过程模式(DLM),包括模式的结构和主要功能模块(能量平衡模块、土壤水热模块、地球化学循环模块、动态植被模块及城市模块),以及模式运行的环境搭建、数据制备及初始化设置方案;第四篇介绍几个DLM模式的应用案例。本书基本反映了陆地表层系统模型模拟与分析应用领域的当前研究进展与未来发展趋势。

本书可供大学及以上程度地球科学相关领域各类人员作为科研、教学和学习参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

陆地表层系统模型模拟与分析/陈报章等著. —北京: 科学出版社, 2017.4
(地球信息科学基础丛书)
ISBN 978-7-03-052003-6

I. ①陆… II. ①陈… III. ①地表—系统模型—研究 IV. ①P931.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第044055号

责任编辑: 杨帅英 张力群 / 责任校对: 何艳萍
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年4月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年4月第一次印刷 印张: 25 1/4 插页: 4

字数: 580 000

定价: 149.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序

传统地理学研究陆地表层地理要素发生、发展规律及其区域分异规律，其更多关注土壤、水文、植被、气候、人文等单一要素在区域上的演变规律，探讨区域之间的差别及联系。但是事实上，作为与人类生存和活动密切相关的一个薄层，陆地表层是自然过程（土壤、生物、水文和地貌过程）与人文过程交织在一起的、开放的复杂巨系统。传统学科的继承与以学科交叉、综合为主要特点的新兴学科的发展同等重要。这是科学发展所遵循的一般规律，同时也是为解决综合问题提供科学依据的必然出路。其基本出发点，就是采取系统方法对地球表层中的有关事物在综合原理指导下进行分析，在分析基础上进行再综合，为社会发展、区域持续发展提出有关信息、意见和建议。

陆地表层系统模拟是一项具有相当难度的多学科交叉的前沿性探索，以数理解析为基础，并与植物生理生态、环境因素等紧密相连。采用模型模拟的方法研究陆地表层的各个过程及其相互之间的联系，有助于对学科本质属性的定量阐述和理论深化，并为应用目标的实现构建桥梁。在人们尚没有完全认知地-气间物质、能量交换过程、机理与规律的情况下，集合现有各相关学科的知识，采用数值模拟的方法对真实过程进行适当简化、构建模型，通过模型模拟揭示陆地表层系统水、土、气、生等关键要素的相互作用机制及时空演化规律，提高对陆地表层系统结构与功能的认识；阐明陆地表层系统中人与自然相互作用的耦合过程及关联机理，为区域可持续发展提供科学依据。

由陈报章研究员撰写的这本专著反映了目前陆地表层系统模式模拟和分析领域的最新研究成果，是十余年研究累积的结晶。该书内容丰富，从全球变化到地球系统模式；从水热传输、能量平衡到生物地球化学循环过程；从植物生理生态过程到植被物候、动态植被策略；从自然生态系统到人工生态系统（城市）；从模式构建到模式实验、模式应用和模拟结果分析提升；从模式运行到模式优化（包含结构算法优化和参数化方案优化）。该书重点介绍的 DLM 模式及其应用研究均为著者的原创性成果。这些成果为我国陆地表层系统模式模拟及其在全球变化领域的应用研究的未来发展打下了良好的基础。



前言

本书是面向全球环境变化科学、地理学、大气科学、气象气候学、生态学、环境科学等专业研究生编写的教程。自 20 世纪 80 年代开始,国际科学界先后发起并组织实施了以全球环境变化为研究对象的多个研究计划。全球环境变化科学以“地球系统”为研究对象。其中,陆地表层过程作为关键的环节将大气圈、水圈(含冰雪圈)、生物圈和岩石圈紧密联系在一起。陆地表层过程研究的核心是探讨陆地表层系统内各圈层之间的相互作用,物理、化学和生物过程之间的耦合过程与机制,以及人类活动与自然之间的相互作用等,常用的研究方法包括地表原位观测、地面遥感、卫星遥感和模型模拟等。近些年来,随着大量观测数据的积累和定量化、系统化研究的需求,模型模拟得到了快速发展和广泛应用。

经过 20 多年的努力,中国的陆地表层过程模拟研究已经有了长足的进步,不仅引进或翻译了一些国外陆面过程模式研究的书籍,而且国内研究者们也陆续发表了针对不同应用领域和具体问题的模式应用方面的研究成果。但是,目前缺乏系统介绍我国陆面过程模式及其应用最新进展方面的书籍。地球表层系统模式模拟不仅涉及地球科学的诸多学科,包括地理学、气象学、大气科学、土壤学、冻土学、水文学、植物生态学、植物生理学、生物地球化学和全球变化科学等学科,而且在认知地球表层系统各子系统和相互耦合关联的所有主要过程的基础上,通过合理、恰当的数学表达和数值解法等方法,并行计算等计算机技术实现对地球表层系统的模拟与分析。目前地球科学研究正经历从定量化向系统化的转型,亟需一部全面而系统的介绍该领域研究背景、研究内容、技术方法、研究现状和发展趋势的书籍。

本书共 4 篇 22 章,从与全球变化科学有关的各类专业的实际需要出发,精选内容,力求兼顾基础性、重要性、系统性、实用性和可操作性。在理论上,力争使读者掌握陆地表层研究的对象、重要过程(机理)、关键变量和算法;在操作上,以自主研发的陆面过程模式 DLM 为例,详细介绍模式的结构、组成、各功能模块、输入数据制备和模式运行;在模式应用方面,通过实例研究,介绍模式机理研究和模式应用成果。此外,本书在力图全面阐述采用模式模拟方法定量研究地球表面过程的同时,也对由于机理认识程度和现有模式模拟方法局限性等所产生的不确定性提出思考,希望读者在阅读的同时用发展的眼光和怀疑的态度去对待书中的内容。

地球表层系统模式模拟和动态陆面过程模式(DLM)研发团队的一线骨干参与了不同章节的撰写,有陈婧、孙少波、林晓凤、车明亮、周子渊、许光、徐博轩、王冰洋、刘莹、杨志清和王雨辰,全书由陈报章统稿。

本书的酝酿和雏形可以追溯到 21 世纪初著者在加拿大多伦多大学留学期间,在陈镜明教授指导下完成的一些与陆面过程模式模拟及应用相关的研究工作。历经十余年,几易其稿,终得以付梓。作者在取得本书部分研究成果的过程中,与加拿大不列颠哥伦比亚大学 T. Andrew Black 教授、Nicholas C. Coops 教授、Andreas Christen

副教授,法国原子能与可替代能源委员会环境与气候科学实验室(LSCE)Philippe Ciais教授,美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室Pieter Tans教授,荷兰瓦格宁根大学气象学系沃特·彼得斯(Wouter Peters)教授开展了相关的合作研究和学术交流。感谢他们为本书研究所做的贡献和支持。

本书的研究得到国家自然科学基金面上项目“中国涡度相关通量塔空间代表性评估与碳源汇尺度扩展研究”(41271116)和“景观和区域尺度陆地生态系统碳水耦合循环机理过程与固碳能力研究”(41071059)、国家科技支撑计划项目“国家生态系统观测评估技术系统集成研究与示范”(2013BAC03B04)之专题“中国陆地生态系统生产力和蒸散发监测与模拟分析”(2013BAC03B0415)、中国科学院“百人计划”项目“景观和区域尺度CO₂源汇分布以及陆地生态系统碳氮循环耦合过程对气候变化的响应研究”(O9W90020ZZ)、中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室自主部署创新研究计划资助项目“星-空-地多源碳排放检测数据融合与系统集成研究”(O88RA901YA)和“一三五”战略科技计划项目(2012ZD010)、中国科学院科技先导专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之专题“基于GCM模式的全球同化系统研究”(XDA05040403)、国家高新技术研究发展计划(“863”计划)课题“多源碳观测数据融合与同化技术研究”(2013AA122002)、江苏省老工业基地协同创新中心建设项目和江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心建设项目等的支持。

在项目实施和专著写作过程中,得到中山大学戴永久教授、袁文平教授、北京师范大学周涛教授、刘绍民教授,中国科学院地理科学与资源研究所孙九林院士、刘纪远研究员、周成虎院士、葛全胜研究员、邵全琴研究员、于贵瑞研究员、刘卫东研究员、邓祥征研究员、莫兴国研究员、欧阳竹研究员、李发东研究员、王绍强研究员、姚一鸣高级工程师、黄玫副研究员,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所李新研究员、陈仁升研究员,中国科学院遥感与数字地球研究所施建成研究员、陈良富研究员,中国科学院大气物理研究所曾庆存院士、吴国雄院士、吕达仁院士、季劲均研究员、孙荻芬研究员、曾晓东研究员、林朝晖研究员、徐永福研究员、段安民研究员、张美根研究员,中国矿业大学汪云甲教授、张绍良教授的指导与帮助,在此对各位同事表示衷心的感谢。

本书部分成果已在国内外刊物上发表。在本书撰写过程中,作者参考了国内外大量研究论文、优秀著作和相关网站资料,在此表示衷心感谢。虽然作者试图在参考文献中全部列出并在书中表明出处,但难免仍有疏漏之处,在此诚挚地希望得到同行专家的谅解与支持。

在编写此书时,作者力求深入浅出,通俗易懂,并尽量做到图文并茂。希望本书的出版能为从事相关领域的科研、教学、业务人员和研究生带来帮助。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免。在专著行将出版之时,著者诚惶诚恐,唯期待读者批评指正。关于本书内容的任何批评、意见和建议,请发至电子邮箱: baozhang_chen@163.com。

书中除附后彩图外,更多彩图资源请见在线服务网址: <http://www.sciencereading.cn>,供读者参阅。

陈波章

目 录

序
前言

第一篇 地球系统模式研究进展与展望

第 1 章 全球变化与地球系统模拟.....	3
1.1 地球系统	3
1.2 地球系统科学	7
1.3 全球变化研究	10
参考文献	18
第 2 章 地球系统模式的发展历程及展望.....	24
2.1 全球变化与地球系统模拟	24
2.2 地球系统模式发展历程	25
2.3 地球系统模式展望	27
参考文献	28
第 3 章 地球系统模式简介.....	30
3.1 模式的主要构成	30
3.2 典型地球系统模式介绍	38
参考文献	43

第二篇 陆地表层系统模拟的原理与方法

第 4 章 陆地表层系统及其构成.....	49
4.1 陆地表层系统简介	49
4.2 陆地表层系统构成	53
参考文献	73
第 5 章 陆地表层系统过程及其定量表述.....	78
5.1 物质能量循环	78
5.2 土壤水热过程	91
5.3 城市系统湍流过程	97
5.4 植被动力学过程	100
参考文献	103
第 6 章 陆地表层系统模拟及模型发展历程.....	107
6.1 陆地表层系统模拟原理	107

6.2	陆地表层模式发展历程	111
6.3	陆地表层模式发展趋势	114
	参考文献	115
第 7 章	典型陆面过程模式介绍	117
7.1	CLM 模式	117
7.2	SiB 模式	124
7.3	BATS 模式	128
7.4	CLASS 模式	131
7.5	CoLM 模式	138
7.6	AVIM 模式	140
7.7	IBIS 模式	144
7.8	LPJ 模式	148
	参考文献	154
第 8 章	模型优化	158
8.1	模型参数优化	158
8.2	模型结构优化	164
	参考文献	166
第 9 章	模型验证与评价	169
9.1	模型认识上的常见谬误	169
9.2	模型验证的对象	171
9.3	模型验证的要素	171
9.4	模型验证的方法	179
	参考文献	180

第三篇 DLM 模式

第 10 章	模式概述与结构	185
10.1	概述	185
10.2	DLM 发展过程	185
10.3	DLM 模式结构	187
10.4	DLM 植物个体结构	195
	参考文献	196
第 11 章	能量平衡模块	200
11.1	辐射	200
11.2	潜热通量	201
11.3	感热通量	202
	参考文献	203
第 12 章	土壤水热模块	204
12.1	土壤能量平衡和热过程	204

12.2 积雪过程206

12.3 土壤水207

12.4 DLM 高寒地区土壤湿度参数优化与模拟实验210

参考文献224

第 13 章 地球化学循环模块.....226

13.1 光合作用226

13.2 呼吸作用228

13.3 碳氮循环230

参考文献233

第 14 章 植被物候模块.....235

14.1 植被生长季指数（GSI）模型235

14.2 DLM 物候策略.....236

14.3 DLM 物候碳氮通量.....238

14.4 模式模拟实验.....240

14.5 结果分析及模型评价.....246

14.6 模型不确定性分析.....253

参考文献257

第 15 章 动态植被模块.....259

15.1 植被生存和萌发.....260

15.2 生物量分配及输送.....262

15.3 植被光竞争.....265

15.4 胁迫干扰267

参考文献268

第 16 章 城市模块270

16.1 模块结构270

16.2 能量通量传输过程.....272

16.3 人为热通量过程.....278

参考文献283

第 17 章 DLM 模式运行285

17.1 运行环境搭建.....285

17.2 输入数据制备.....295

17.3 模式初始化方案.....297

参考文献301

第四篇 DLM 模式应用

第 18 章 陆面过程模式中不同蒸散发算法的比对305

18.1 引言305

18.2	材料和方法.....	306
18.3	模拟结果	311
18.4	讨论	320
18.5	结论	322
	参考文献	322
第 19 章	陆面-大气耦合模式尺度转换研究	325
19.1	耦合模式空间尺度转换方法.....	325
19.2	模式描述	326
19.3	结果和讨论.....	330
19.4	结论	338
	参考文献	338
第 20 章	1981~2005 年中国东部土地覆盖变化对陆表能量分配的影响	340
20.1	输入数据与参数化方案.....	340
20.2	结果和讨论.....	353
20.3	结论	355
	参考文献	356
第 21 章	集成陆面过程模式 (DLM) 在区域尺度上的物候模拟评估	357
21.1	引言	357
21.2	材料和方法.....	358
21.3	结果和讨论.....	361
21.4	结论	372
	参考文献	373
第 22 章	北半球落叶植被物候变化时空特征模拟与分析	374
22.1	引言	374
22.2	材料和方法.....	375
22.3	结果和讨论.....	378
22.4	结论	388
	参考文献	390

彩图

第一篇 地球系统模式研究 进展与展望

第 1 章 全球变化与地球系统模拟

1.1 地 球 系 统

自古以来,人类从未停止过对地球的探索活动。在此征程中,人类对地球的认识不断趋于科学化。20 世纪 80 年代,美国国家航空与航天管理局(NASA)出版了第一部《地球系统科学》(*Earth System Sciences*)专著,首次提出把地球作为一个由多个相互作用的子系统构成的完整系统进行研究(NASA, 1988; 陈泮勤, 1992)。普遍意义上,地球系统被定义为一个由大气圈、水圈(含冰雪圈)、岩石圈和生物圈组成的复杂系统,组成该系统的要素处在一个相互作用的动态系统中。在地球系统中发生的各种时间尺度上的变化是该系统各分量(圈层)相互作用的结果、三大基本过程(物理、化学和生物学过程)相互作用的结果及人与环境(生命与非生命系统)相互作用的结果(孙九林和林海, 2009; 陈泮勤, 2003)。从概念上看,当前对地球系统的研究,不仅强调系统的整体性和系统组成要素之间的相互作用过程,而且更加关注人类活动对地球系统的影响。越来越多的研究揭示,在过去的几个世纪里,人类活动直接或间接地对地球系统产生了显著的影响,且这种影响呈持续、加速趋势(Vitousek et al., 1997; Falkowski et al., 2000; Hooper et al., 2005; Moss et al., 2010; IPCC, 2013b; Qin et al., 2014; Shikazono, 2015)。认识地球系统运行机制及其对越来越强烈的人类活动的响应,最大程度减小全球变化对人类社会生存发展带来的负面影响是当前国际社会和科学界最为关注的问题之一。

1.1.1 地球系统组成

地球系统主要由大气圈、水圈(含冰雪圈)、岩石圈和生物圈构成。

大气圈又称大气层,是地球最外部的气体圈层。大气层主要成分为氮(78.084%)、氧(20.946%)、氩(0.934%)、水汽(0.25%)、二氧化碳(0.032%)和仅占小于 0.04% 的微量气体。构成大气层的混合气体称为空气,地球大气层总质量约为 $5.136 \times 10^{21} \text{g}$,相当于地球质量的 0.86%。由于地球引力作用,几乎全部的空气集中在距离地球表面 100km 的高度范围内。根据大气温度垂直方向上的分布和运动特征,通常将大气层由低到高划分为对流层、平流层、中间层、热层和散逸层。大气层具有保护地表避免太阳辐射直接照射的作用,特别是位于距地面 20~50km 处的臭氧层具有吸收大量对人类、动物及植物生长有害的太阳紫外辐射的作用。地球大气层为地球上生物生存和进化提供了一个稳定的环境,是地球上生物的“保护伞”。

水圈由地球系统中不同形式的水构成,包括冰雪(由于冰雪对减缓全球变暖的重要作用,有时被分离出来,称为冰雪圈)。水圈中的水主要以液态、气态和固态三种形式存在于大气、地表和地下,包括大气中的水、海水、陆地水,以及生物体内的生物水。大部分地球水是以液态和固态的形式聚集在地表,构成各种水体,如冰川、海洋、河流、

湖泊、水库等。

岩石圈包括地壳和上地幔顶部之间平均厚度约 100 km 的带有弹性的坚硬岩石圈层。地壳是地球表面一层由岩石组成的固体外壳，是地球固体圈层的最外层，平均厚度约 17 km。其中大陆地壳厚度较大，平均约为 33 km。大洋地壳则远比大陆地壳薄，厚度只有几千米。地幔是地球的中间层，厚度约 2865 km，主要由致密的造岩物质构成。地幔分为上地幔和下地幔两部分。上地幔主要由橄榄岩类组成，下地幔是由密度高的铁镁氧化物组成。岩石圈内岩浆岩、变质岩和沉积岩三大类岩石之间物质循环过程塑造了地表基本形态。

生物圈的概念由奥地利地质学家休斯（E. Suess）在 1875 年首次提出。广义上的生物圈是指地球上所有生物以及与它们存在相互关联性的其他物质与系统，包括生物与岩石圈、水圈和空气的相互作用。狭义上的生物圈是一个封闭且能自我调控的系统。生物圈包括地球上所有活体生命、有生命过程和转变的空气、陆地、岩石圈和水体范围，可简单理解为大气圈、水圈和岩石圈中适于生物生存的范围，主要由大气圈底部、岩石圈表面以及水圈组成。生物圈为生物的生存提供了基本条件。人类作为其中占统治地位的生物，能大规模地改变生物圈，使其为人类的需要服务。然而，人类毕竟只是生物圈中的成员之一，其对生物圈的改造必然受到其他成员的限制，超过限度就会破坏生物圈的动态平衡，造成严重后果。

1.1.2 地球系统组成要素间的相互作用过程

全球变化背景下的地球系统科学不仅仅是传统意义上对于地球系统中单一子系统的关注，而且需要更多关注地球系统中各个子系统间的相互作用过程，即地球系统在太阳辐射作用下进行的各种物理、化学、生物过程的相互作用。这些相互作用过程包括地球系统内的物质运移和能量传输等各种过程。Steffen 等（2006）在《全球变化与地球系统——一颗重负之下的行星》一书中，通过以下六个作用过程描述地球系统中不同子系统之间的作用（五个自然过程以及人类活动）。

1. 海洋洋流

海洋洋流又称海流，是海水常年沿一定方向进行的相对稳定的大规模流动。洋流形成的主要因素包括：地球能量纬向分布不平衡造成的地球表面风场、热盐效应造成的海水密度分布的不均匀和地转偏向力作用。洋流在地球系统中扮演着十分重要的角色，洋流的连通作用对地球系统能量的再分配、生物圈活动以及全球气候系统都会造成迅速而巨大的影响。

2. 大气输送

地球的球形弧度导致地球表面吸收太阳辐射和发射能量呈不均匀分布，这种能量的不均匀分布驱动着大气时刻处于不同形式的运动之中。大气运动使得热量、水汽夹杂着包括气溶胶微粒在内的某些物质从海洋、地表输送至大气，并经由风的作用，进入地球系统中的其他区域和子系统。在大气输送过程中，物质的原有形态受大气温度、湿度、气流压力和太阳辐射的作用，也会发生化合、分解化学作用，形成新的物质。

3. 水文输送

地球系统中的水圈是一个永不停息的动态系统。在太阳辐射和地球引力的作用下,水在水圈各组成部分之间循环运动,构成全球范围的循环,继而把各种水体连接起来,使得各种水体能够长期存在。地球水循环伴随着物质和能量的输送:在太阳能的作用下,海洋表面的水蒸发到大气中形成水汽;水汽随大气环流运动,一部分进入陆地上空,在一定条件下形成雨雪等降水;大气降水到达地面后成为地表径流、土壤水和地下水,地表径流和地下径流最终又回到海洋,由此形成水圈主循环。

4. 生物群系的连通

生物圈与其他圈层间强烈的相互作用创造并维持了适于生命居住的环境,强烈的相互作用过程表现为热能与化学能的交换。生物需要从地球系统圈层中吸收热量保持生命过程所需温度,同时生物活动过程也会释放热量到其他圈层。化学能交换主要表现为物质交换:生物圈中生物活动从其他圈层吸收所需物质,同时也通过新陈代谢过程不断向环境中输出物质,生物死亡后生物体经分解作用又返回其他圈层。

5. 气候系统的遥相关

气候系统由大气、海洋、陆地表面、冰雪覆盖层和生物圈等共同组成。在太阳辐射的作用下,气候系统内部产生一系列复杂的过程。通过物质交换和能量交换,各个组成部分之间紧密连接形成一个复杂的开放巨系统。气候系统的热力学和动力学特性,以及反馈过程决定了气候系统内部各圈层间复杂、剧烈的相互作用过程。

1.1.3 地球系统中的人类活动

在过去的两个多世纪里,人类社会空前发展,人类活动对地球系统的影响程度和影响范围也超过了有史以来的任何时候。这主要表现在,一方面人类活动正以前所未有的幅度和速度影响着地球系统的运转机制,另一方面人类也受到地球变化带来的严峻挑战,一系列由于全球变化引起的环境问题对人类的生存环境和社会的发展构成了严重威胁(Brauch, 2005)。当前,关于“人类活动显著影响并改变地球系统运行状态”的这一结论已毋庸置疑。地球系统中各个组分均显著受到人类活动的影响,大气系统、海洋系统、陆地系统、生物圈状态以及将它们联系在一起的生物地球化学循环均表现出明显的人类活动响应(Steffen et al., 2010)。人类活动对地球系统的影响主要表现为对地球陆地、大气圈、水文循环、海岸带和海洋环境、生物多样性及碳循环等的改变(Steffen et al., 2004)。

土地覆盖变化时间序列显示,过去的300年中,森林和草地转变为耕地的速率显著加快。1700~1850年,欧洲、印度恒河流域、中国东部地区以及美洲大陆耕地缓慢扩张。此后,世界范围内的耕地快速扩张,尤其以1900~2000年的扩张最为明显(Ramankutty and Foley, 1998; Goldewijk and Battjes, 1997; Goldewijk, 2001),进入21世纪后,全球土地变化更达到了前所未有的程度(Foley et al., 2005; 刘纪远等, 2011, 2014)。1750~2011年,以森林面积减少为主的土地利用变化导致大气中CO₂排放量增加了约180(100~260)Pg(Boden et al., 2011; Houghton et al., 2012; Harris et al., 2012)。

大气圈为地球生命的产生和发展提供了稳定的环境基础,生命过程又对大气圈产生反馈作用。伴随着人类社会的发展,人类活动对大气圈的影响不断加剧。尤其是工业革命以来,人类活动对大气成分的影响急剧上升,大气承受着比以往任何时候都多的化学负担。以人类对温室气体、气溶胶的影响为例,由于人类活动导致的大气成分发生变化的速率已达到了惊人程度。政府间气候变化专门委员会(IPCC)的评估报告(AR4, AR5)指出:工业革命以来,大量化石燃料的燃烧、水泥制造、森林砍伐和土地利用变化等生产活动向大气中排放了大量CO₂;截至2011年,大气中CO₂的浓度已达到391 ppm(1ppm=10⁻⁶),较1750年以前上升了40%;与冰芯观测资料相比,以CO₂为主的温室气体浓度达到了过去80万年来的最高值,其增速也超过了过去2万年来的任何时候。15个地球系统模式(ESM)预估的4个情景下2012~2100年全球累积排放的CO₂量,最少为140 GtC,最多高达1910 GtC(IPCC, 2014a, 2007b; 沈永平和王国亚, 2013)。硫酸盐气溶胶粒子、植物和矿物燃烧烟尘以及矿物粉尘是人类对大气气溶胶影响最大的三种成分。工业革命以前,大气中硫酸盐浓度水平为26 ng/g。而到20世纪60年代,其浓度达到峰值110 ng/g。据估算,由于人类燃烧的植物和矿物质导致的大气烟尘量比自然源高出了10倍(Brasseur et al., 2003)。大气中的矿物粉尘同样也处于不断增加之中,在旱地区表现尤为严重(Fischer et al., 2007; Lambert et al., 2012, 2013; Yue et al., 2010; Kok, 2011; Zhao et al., 2006; 张小曳等, 2013)。

水文循环,尤其是陆地水循环,已成为地球系统中受人类活动影响最多的子系统之一,特别是最近50年内人类活动的影响可能已经超过陆地水系的自然强迫作用(Meybeck and Vörösmarty, 2004)。大量的水坝、水库以及无节制的水资源需求对自然水循环系统造成了难以估量的影响。据不完全统计,全世界超过15m的水坝已经超过45 000个,各类小水坝更是不计其数(Vörösmarty et al., 2003; Steffen et al., 2004)。截至20世纪90年代,北半球最大的139条河流中未受水库影响的仅占23%(Dynesius and Nilsson, 1994)。当前,国际大坝委员会(ICOLD)登记在册的水坝数量达58 266座,每年约有16 000 km³径流量被大型水坝拦截,约相当于每年流入海洋径流总量的40%(Vörösmarty et al., 2003; ICOLD, 2015)。

受全球变暖加剧的影响,从20世纪至今,世界上主要河流的径流量并未增加,反而显著降低(Milliman et al., 2008; Dai et al., 2009)。通过对925个观测站数据的分析发现,在过去的几十年,世界上最大的200条河流(包括刚果河、密西西比河、叶尼塞河、巴拉那河、恒河、哥伦比亚河、乌拉圭河和尼日尔河)中有45条河流的流量显著减小(Dai et al., 2009)。中低纬度地区许多主要河流径流量也表现出显著减少的趋势,如1960年以来黄河径流量持续在减少(Piao et al., 2010)。过度抽取地下水是人类活动对水循环严重影响的另一个方面,由于地下水大量开采导致地面沉降、土壤污染等问题尤为严重(Custodio, 2002; Shah et al., 2000; Bhattacharya et al., 2007; Mays, 2013),如中国北方地区、印度、非洲等人口密集区,由于水资源短缺以及过度开采地下水带来的环境压力日渐增加(Changming et al., 2001; Qu and Fan, 2010; Narmada et al., 2015; Mohammad et al., 2015; Odada, 2013; Wang et al., 2014)。

人类活动对海岸带和海洋的影响主要表现为:海岸工程以及港口、城市建设改变海岸带地貌;人为海岸带生态系统的转变;近岸海水营养物质、污染物大量增加和渔业活

动对海洋生态系统的直接和间接影响。

此外,人类活动对地球系统的影响还表现在对地球生物多样性的改变和碳、氮、磷、硫元素的改变。已有的大量研究表明,人类活动正在导致地球生物多样性的变化超过了自然变化速率,生物灭绝速率比没有人为影响下的自然灭绝速率高出 100~1000 倍(Pimm et al, 1995; Patz et al., 2012; Magurran, 2013; Ricklefs, 2012),目前的地球正处于地球史上第六次大灭绝事件期间(Eldredge, 2000; Wilson, 1999; Naeem et al., 2012)。由于人类活动导致大气中 CO_2 量剧增引发的全球变暖是当前人类活动改变地球系统最为显著的例子,这部分内容将在 1.3 节做详细论述。

1.2 地球系统科学

地球系统科学是 20 世纪 80 年代末伴随着地球系统概念的提出而出现的新兴学科,将地球大气圈、水圈、岩石圈和生物圈作为互相作用的大系统,研究其物理、化学和生物过程,了解现状和过去,并预测未来(黄秉维, 1996; Mackenzie and Mackenzie, 1998)。地球系统科学在时间尺度上跨度很大,可以是过去和未来的数年、数十年、数百年、数万年甚至百万年尺度。地球系统科学是跨自然科学和社会科学的学科,不仅包含传统意义上的地理科学,而且包含社会、经济、政治等学科。下面从地球系统科学发展的背景、研究目标、研究内容以及研究方法四个方面进行系统介绍。

1.2.1 地球系统科学的发展背景

地球系统科学是全球变化环境下多学科发展到一定阶段的产物,首先由美国国家航空航天局(NASA)提出。1983 年,为研究全球环境,特别是气候变化,NASA 计划对地球各圈层物质能量运移规律进行系统监测,为此设立了地球系统科学委员会,并于 1988 年出版了《地球系统科学》一书(NASA, 1988; 陈泮勤等, 1992)。地球系统科学的诞生和发展,主要源于以下几个促成因素。

1. 人类面临全球变化带来的一系列严重环境问题

强烈的人类活动导致的全球变化,正迅速地改变着地球环境,已成为当前国际社会的共识。如何应对全球变化问题是当前人类面临的巨大挑战,这一命题迫使人们必须首先认识地球系统本身的活动机制,从而在此基础上规范、控制和调整人类自身的行为,尽可能地避免或适应全球变化带来的负面效应,最大限度地使地球环境向有利于人类的方向发展(陈泮勤, 2003; IPCC, 2007a, 2007b, 2013a, 2013b, 2014a, 2014b; Qin et al., 2014; Shikazono, 2015)。

2. 多学科发展成熟

传统地球科学着重于对某一细分领域的深入研究,这样的研究方法与人类社会实践的发展阶段是相适应的。经过过去几个世纪的发展,地球科学在各个领域取得了许多成就,形成了完整的学科体系,如地理学、海洋学、气象学、地质学、生态学等。各个学科的研究成果也取得了公认的经济、社会效益。然而,由于地球系统的空间广域性、形