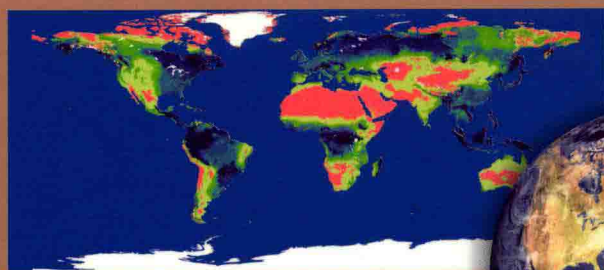


Principles and Methods for
Simulating Earth's
Surface Systems

地球表层系统 模拟分析原理与方法

岳天祥 等 著



$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left\| \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \cdot z^{(n+1)} - \begin{bmatrix} d^{(n)} \\ q \\ h \end{bmatrix} \right\|_2 \\ s.t. \quad S \cdot z^{(n+1)} = k \\ \quad \quad C \cdot z^{(n+1)} \leq b \\ \quad \quad l < z^{(n+1)} < u \end{array} \right.$$



科学出版社

地球表层系统模拟分析原理与方法

岳天祥 等 著

国家自然科学基金重点项目 (91325204)
国家高技术研究发展计划 (2013AA122003) 资助出版
国家自然科学基金创新群体 (4142100101)
国家科技支撑计划 (2013BAC03B03)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

地基观测可获得观测点处的高时间分辨率、高精度数据。然而,尽管地基观测点在不断加密,但永远不可能达到区域模拟所需要的观测点密度,尤其是在海洋和无法进入的大片森林地区。卫星遥感可提供地基观测无法提供的空间连续地表信息,但其时间分辨率太粗,不能提供地理和生态过程信息。为了解决由此引起的误差问题、多尺度问题和大数据问题,我们经过30年来的持续努力,建立了外蕴量(宏观信息)和内蕴量(细节信息)一体化的高精度地球表层建模方法,并通过大量理论分析和实证研究,提炼形成了地球表层建模基本定理及其关于空间插值、尺度转换、数据融合和数据同化的推论。本书对高精度地球表层建模方法、地球表层建模基本定理及其推论的相关理论方法发展过程与应用案例进行了全面总结和梳理,并展望了需要继续深入研究的主要内容和问题。

本书可供地理信息学、生态信息学和环境信息学等领域的本科生、研究生和学者参阅。

图书在版编目(CIP)数据

地球表层系统模拟分析原理与方法/岳天祥等著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-052953-4

I. ①地… II. ①岳… III. ①地表-曲面-建立模型 IV. ①P931.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第115992号

责任编辑:韩 鹏 胡晓春 刘浩旻/责任校对:张小霞 何艳萍

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

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

*

2017年4月第 一 版 开本:890×1240 1/16

2017年4月第一次印刷 印张:28 3/4

字数:948 000

定价:268.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

本书在全面总结分析经典曲面建模方法的理论缺陷和克服这些理论缺陷的现代数学理论的基础上,将地球表层系统及其环境要素进行格网化描述,抽象为数学“曲面”,并以微分几何原理和优化控制论为理论基础,开创性地建立了一个以全局性近似数据(包括遥感数据和全球模型粗分辨率模拟数据)为驱动场,以局地高精度数据(包括监测网数据和调查采样数据)为优化控制条件的星空地一体化高精度曲面建模(high accuracy surface modelling, HASM)方法,有效地解决了半个世纪以来困扰曲面建模的误差问题和多尺度问题,形成了相对完整的陆地表层模拟分析理论方法体系。经过30多年来的理论发展与应用实验,我们提炼形成了地球表层建模基本定理(FTESM):地球表层及其环境要素曲面由外蕴量和内蕴量共同唯一决定,在空间分辨率足够细的条件下,地球表层及其环境要素的高精度曲面可运用集成外蕴量和内蕴量的恰当方法(如HASM)构建(Yue *et al.*, 2016a)。根据此定理,推演得出了关于空间插值、升尺度、降尺度、数据融合和数据同化等七个推论。

全书分为三部分,第一部分聚焦 HASM 基本原理;第二部分聚焦 HASM 高时效算法;第三部分聚焦 HASM 应用研究。

第一部分由7章组成:第1章论述了地球表层建模的概念与问题;第2章介绍了几种经典曲面建模方法,以便后续章节对 HASM 的模拟精度进行比较分析;第3章主要与赵娜和杜正平合作,建立了高精度曲面建模(HASM)方法的基本理论体系;第4章主要与陈传法合作,论述了应用型 HASM 方程组求解方法;第5章主要与赵娜合作,论述了理论型 HASM 方程组求解方法;第6章主要与杜正平合作,解决了 HASM 的高阶处理和复杂边界问题;第7章主要与杜正平合作,设计了 HASM 实时动态算法。

第二部分目的在于解决曲面建模速度慢、内存需求大等问题,从而提升 HASM 运算速度和对海量数据的处理能力。第8章,主要与宋印军、杨海和赵娜合作,建立了 HASM 多重网格法;第9章,主要与陈传法合作,建立了 HASM 适应算法;第10章,主要与王世海和赵明伟合作,建立了 HASM 平差计算方法;第11章,主要与赵明伟和王世海合作,介绍了 HASM 并行计算流程。

第三部分主要介绍了 HASM 的成功应用案例和潜在的应用领域。第12章,主要与陈传法和宋敦江合作,阐述了运用地面测点数据建立数字地面模型,以及填补卫星遥感数字地面模型数据空缺部分的方法和过程。第13章,主要与杜正平和王铁夫合作,将 HASM 运用于激光雷达点云数据滤波、插值及与其他来源数据的融合,实现了数字地面模型和树高空间分布模拟分析。第14章,主要与杜正平合作,完成了升尺度和降尺度 HASM 算法设计与案例分析。第15章,主要与王晨亮、赵娜、范泽孟和李婧合作,将气候要素区分为空间平稳和空间非平稳两种类型,详细展示了在仅有地面观测数据的条件下,如何通过统计分析弥补宏观信息并实现空间插值的过程。第16章,主要与赵娜、王晨亮、范泽孟和李婧合作,以中国气候未来情景为案例,设计了空间降尺度算法,并论述了其实现过程。第17章,主要与杜正平、范泽孟和鹿明合作,实现了 HASM 在江西省的气候曲面动态和生态系统对其动态响应过程的模拟分析。第18章,主要与杜正平和李启权合作,运用 HASM 完成了世界上面积最大、黄土层最厚、保存最完整的董志塬土壤性质空间插值和梯条田综合土壤肥力模拟分析。第19章,主要与李启权合作,在中国第二次土壤普查数据中,筛选了6248个典型土壤剖面,在对其数据空间平稳性分析和主成分分析的基础上,运用 HASM 实现了土壤属性空间插值和土壤质量综合分析。第20章,主要与范泽孟合作,在 HASM 产出高精度生物气候曲面的基础上,在中国国家层面模拟了潜在生态系统的变化趋势和未来情景。第21章,主要与范泽孟合作,通过建立土地覆盖分类及其概率转移矩阵,发展了一种土地覆被未来情景模拟的新方法。第22章,主要与王铁夫和赵明伟合作,以国家森林资源连续清查数据为优化控制条件,以遥感信息模型输出为驱动场,实现

了 HASM 对中国森林碳储量的高精度模拟分析。第 23 章, 主要与田永中和王晨亮合作, 运用我国前辈发展的经验模型, 对中国陆地生态系统的人口承载能力进行了模拟分析, 为基于 HASM 的食物供给同化模型奠定了基础。第 24 章, 主要与王情、王晨亮和刘熠合作, 在分析退耕还林还草、城镇化和南水北调等重大工程基础上, 结合农业部农业调查数据, 对我国粮食供给变化趋势进行了模拟分析。第 25 章, 主要与王英安合作, 构建了人口分布曲面建模方法, 模拟分析了中国人口空间分布的变化趋势和未来情景。第 26 章, 对以往研究和未来计划作了简要总结与展望。

在此向为完成本书给予过指导和帮助的老师 and 前辈, 以及付出艰苦劳动和辛勤汗水的弟子们表示真挚的谢意。

岳天祥

2017 年 4 月 24 日

目 录

第一部分 HASM 基本原理

第 1 章 地球表层建模的概念与问题	3
1.1 地球表层建模研究进展	3
1.1.1 地球表面形态表达	3
1.1.2 地球气候系统模拟	3
1.1.3 生态建模	4
1.1.4 地球表层模拟系统	5
1.2 有关国际研究计划	6
1.3 地球表层建模存在的主要问题	8
1.3.1 误差问题	8
1.3.2 多尺度问题	8
1.3.3 三维实时可视化问题	9
1.3.4 地球表层模拟速度问题	9
1.4 撰写本书的目的	9
第 2 章 经典曲面建模方法	11
2.1 经典曲面建模方法的发展及其误差问题	11
2.2 经典曲面建模方法的数学表达	13
2.2.1 趋势面分析法	13
2.2.2 反距离权重法	13
2.2.3 不规则三角网法	13
2.2.4 克里金法	14
2.2.5 样条函数法	14
2.2.6 薄板样条函数法	15
2.3 讨论	15
第 3 章 高精度曲面建模方法的基本理论体系	17
3.1 曲面建模方法探索与曲线等同度指数	17
3.2 基本原理	18
3.2.1 控制论	18
3.2.2 微分几何学原理	19
3.2.3 曲面论基本定理	20
3.2.4 HASM 停机准则	22
3.3 高精度曲面建模方法	22
3.4 HASM 算法设计与比较分析	30
3.4.1 驱动场选择对算法精度的影响分析	30
3.4.2 差分离散格式对算法精度的影响分析	34
3.4.3 主方程选择对算法计算效率的影响分析	37

3.4.4	采样方式对 HASM 收敛速度的影响分析	37
3.4.5	采样方式对 HASM 精度的影响分析	39
3.5	曲面复杂度与 HASM 模拟精度关联性分析	40
3.6	讨论	44
第 4 章	应用型 HASM 方程组求解方法	46
4.1	引言	46
4.2	HASM 直接算法	47
4.2.1	HASM 高斯消去法	51
4.2.2	HASM 的平方根法 (HASM-SR)	52
4.2.3	数值实验	53
4.3	HASM 迭代法及其系数矩阵结构	53
4.3.1	HASM 迭代表达	53
4.3.2	系数矩阵结构	55
4.3.3	HASM 高斯-赛德尔算法和 HASM 预处理高斯-赛德尔算法	57
4.3.4	HASM 共轭梯度法和 HASM 预处理共轭梯度法	63
4.4	结论	66
第 5 章	理论型 HASM 方程组求解方法	68
5.1	HASM 快速算法	68
5.1.1	基于不完全 Cholesky 分解的预处理共轭梯度法 (ICCG)	70
5.1.2	基于对称逐步超松弛的预处理共轭梯度法 (SSORCG)	71
5.2	HASM 迭代格式	72
5.3	数值实验	76
5.3.1	HASM 最佳算法	76
5.3.2	HASMab 与 HASMabc 比较	78
5.3.3	HASM 驱动场问题	78
5.3.4	HASM 边界值问题	79
5.3.5	运算速度、占用内存与模拟精度的权衡	80
5.4	讨论	80
第 6 章	HASM 的高阶处理和复杂边界问题	82
6.1	非均匀步长的 HASM 方法	82
6.2	采样矩阵的高阶处理	83
6.3	复杂边界下的 HASM 算法	89
6.4	讨论	93
第 7 章	HASM 实时动态算法	94
7.1	引言	94
7.2	静止窗口实时动态模拟的 HASM 算法	95
7.2.1	数学表达及其求解	95
7.2.2	HASM 系数矩阵的分解	96
7.2.3	HASM 动态加点问题	97
7.2.4	HASM 动态减点问题	98
7.2.5	数值实验	99
7.3	移动窗口实时动态模拟的 HASM 算法	101

7.4 讨论	108
--------------	-----

第二部分 HASM 高效算法

第 8 章 HASM 多重网格法	111
8.1 引言	111
8.2 HASM 多重网格表达	111
8.3 数值实验	113
8.4 实证研究	114
8.5 结论与展望	116
第 9 章 HASM 适应算法	117
9.1 引言	117
9.2 HASM 适应算法	117
9.2.1 HASM 适应算法主方程表达	117
9.2.2 误差估值器	118
9.2.3 格网细化	118
9.2.4 误差指示器	119
9.3 应用案例	119
9.3.1 案例区及其数据获取	119
9.3.2 董志塬数字高程模型构建	120
9.4 讨论	123
第 10 章 HASM 平差计算	124
10.1 平差计算	124
10.1.1 参数平差	125
10.1.2 条件平差	126
10.1.3 逐次条件平差	126
10.1.4 逐次独立条件平差	127
10.2 HASM 平差计算	129
10.3 HASM-AC 时间复杂度和空间复杂度	136
10.3.1 时间复杂度	136
10.3.2 空间复杂度	136
10.4 HASM-AC 误差控制	137
10.4.1 计算模型与数据精度的匹配	137
10.4.2 HASM-AC 误差控制	138
10.4.3 数值实验	138
10.5 实证研究	139
10.5.1 误差表达	139
10.5.2 精度数值实验	139
10.5.3 精度交叉验证	141
10.5.4 计算效率分析	144
10.6 结论	144
第 11 章 HASM 并行算法	146
11.1 引言	146

11.1.1	并行计算的发展	146
11.1.2	并行计算机体系结构	147
11.1.3	并行编程环境	148
11.1.4	并行计算时间效率测定	149
11.2	HASM-AC 的并行算法	150
11.2.1	HASM-AC 并行算法架构	150
11.2.2	HASM-AC 并行算法	151
11.3	HASM-AC 并行算法实现	153
11.3.1	MPI 与 C 语言联合编程	153
11.3.2	并行处理中的进程映射	154
11.3.3	HASM-AC 方法并行计算中的进程同步	156
11.3.4	HASM-AC 并行计算的文件输出	156
11.4	并行计算验证	157
11.5	结论	159

第三部分 HASM 应用研究

第 12 章	数字地面模型构建	163
12.1	引言	163
12.2	数字地面模型构建	164
12.2.1	基于实测数据的数字地面模型	164
12.2.2	高程异常曲面模拟	165
12.2.3	考虑地形特征点的数字地面模型模拟	168
12.3	SRTM 数字地面模型空缺填补	171
12.3.1	数据与方法	171
12.3.2	空缺填补结果分析	173
12.4	讨论	175
第 13 章	LiDAR 点云数据 HASM 算法	176
13.1	引言	176
13.1.1	滤波算法	177
13.1.2	LiDAR 点云数据空间插值	178
13.1.3	地面实测数据、卫星遥感数据和 LiDAR 点云数据融合	178
13.2	HASM 算法	180
13.3	数字地面模型与树高模拟分析	181
13.3.1	样地尺度案例	181
13.3.2	小流域尺度案例	181
13.4	讨论	186
第 14 章	数字地面模型 HASM 尺度转换	187
14.1	引言	187
14.2	降尺度算法	188
14.3	升尺度算法	190
14.4	实证研究	193
14.4.1	DTM 降尺度	193

14.4.2	DTM 升尺度	194
14.5	讨论	198
第 15 章	中国气候空间插值与变化趋势模拟分析	199
15.1	引言	199
15.1.1	空间插值	199
15.1.2	空间非平稳性分析	199
15.2	趋势面模拟与空间平稳性分析方法	200
15.2.1	趋势面模拟	200
15.2.2	空间平稳性分析方法	202
15.3	空间非平稳和空间平稳气候要素分类	205
15.3.1	数据	205
15.3.2	国家尺度年平均气温空间平稳性分析	206
15.3.3	国家尺度的年平均降水空间非平稳性分析	208
15.4	气候要素空间插值结果	213
15.4.1	年平均气温变化趋势分析	213
15.4.2	年平均降水变化趋势分析	215
15.5	不同时期各区最大年平均温度变化和最大年平均降水量变化	217
15.5.1	年平均温度	217
15.5.2	年平均降水量	218
15.6	结论	219
15.6.1	方法	219
15.6.2	气候变化趋势	220
第 16 章	中国气候未来情景降尺度模拟分析	221
16.1	引言	221
16.2	CMIP5 年平均气温、降水的降尺度模型	222
16.2.1	气候情景	222
16.2.2	空间平稳性分析与降尺度模型表达	222
16.2.3	降尺度方法精度比较	223
16.3	CMIP5 精度分析	225
16.3.1	CMIP5 基准数据与气象台站观测数据比较分析	225
16.3.2	RCPs 情景误差分析	227
16.4	气候情景模拟分析	230
16.4.1	年平均气温	231
16.4.2	年平均降水	234
16.5	讨论	237
第 17 章	气候变化及森林生态系统响应模拟分析	241
17.1	引言	241
17.2	气候变化模拟误差及生态系统响应模拟分析	242
17.2.1	气候模拟误差分析	242
17.2.2	HLZ 生态系统模拟对气候变化插值误差的响应	246
17.3	气候变化	248
17.3.1	年平均气温变化	248
17.3.2	年平均降水变化	249

17.3.3	气候变化	250
17.4	生态系统变化趋势	251
17.4.1	生态系统分布与面积变化	251
17.4.2	生态系统平均中心移动	253
17.5	结论	254
17.5.1	生态系统模拟结果对气候模拟误差的响应	254
17.5.2	森林生态系统对实际气候变化的响应	254
第 18 章	土壤质量空间模拟分析实验	256
18.1	引言	256
18.2	数据与方法	257
18.2.1	研究区域	257
18.2.2	数据获取	258
18.2.3	基于内梅罗指数的土壤质量评估方法	259
18.2.4	模拟精度分析方法	261
18.3	模拟结果对比分析	261
18.3.1	有机质模拟结果对比	261
18.3.2	全氮模拟结果对比	263
18.3.3	碱解氮模拟结果对比	266
18.3.4	全磷模拟结果对比	268
18.3.5	有效磷模拟结果对比	270
18.3.6	速效钾模拟结果对比	272
18.3.7	pH 模拟结果对比	274
18.3.8	碳氮比和氮磷比模拟结果对比	276
18.3.9	综合肥力模拟结果对比	280
18.4	讨论	284
第 19 章	中国土壤质量综合评价	285
19.1	引言	285
19.2	数据与方法	285
19.2.1	土壤数据	285
19.2.2	环境数据	286
19.2.3	研究方法	287
19.3	典型土壤剖面统计特征	290
19.3.1	土壤 pH	290
19.3.2	土壤有机质	291
19.3.3	土壤全氮	292
19.3.4	土壤全磷	294
19.3.5	土壤全钾	295
19.3.6	土壤碱解氮	296
19.3.7	土壤有效磷	297
19.3.8	土壤速效钾	299
19.3.9	表层土壤厚度	300
19.4	土壤性质模拟分析	301
19.4.1	主成分分析	301

19.4.2	回归分析	302
19.4.3	中国表层土壤主要指标模拟结果	305
19.4.4	中国表层土壤质量综合评价结果	311
19.5	讨论	311
第 20 章	陆地生态系统变化模拟分析	313
20.1	引言	313
20.2	方法	313
20.2.1	HLZ 分类系统	313
20.2.2	生态空间分布模型	314
20.3	国家尺度潜在陆地生态系统模拟	315
20.3.1	中国陆地生态系统的变化趋势	315
20.3.2	HLZ 生态系统的面积变化趋势	317
20.3.3	生态多样性和斑块连通性	320
20.3.4	平均中心移动	320
20.4	国家尺度的 HLZ 生态系统情景分析	323
20.4.1	中国 HLZ 生态系统面积变化的未来情景	323
20.4.2	平均中心移动	334
20.5	讨论	338
第 21 章	土地覆被变化未来情景模拟分析	339
21.1	引言	339
21.2	土地覆盖分类及其概率转移矩阵	339
21.3	土地覆盖空间分布未来情景	341
21.4	土地覆盖结构变化	347
21.5	土地覆盖类型平均中心移动趋势	352
21.6	讨论	355
第 22 章	中国碳储量模拟分析	357
22.1	引言	357
22.1.1	全球研究概况	357
22.1.2	中国研究概况	358
22.1.3	机理模型	359
22.2	数据与方法	360
22.2.1	国家森林资源连续清查数据	360
22.2.2	方法	361
22.2.3	模型评价	365
22.3	模型不确定性分析	367
22.4	结论	369
第 23 章	中国人口承载力模拟分析	370
23.1	引言	370
23.1.1	土地承载力概念	370
23.1.2	全球人口承载力估算	370
23.2	中国土地人口承载力估算方法	371
23.2.1	生态阈值	371
23.2.2	陆地生态系统食物供给潜力模型	374

23.3 数据	375
23.3.1 陆地生态系统的分类数据	375
23.3.2 计算食物供给潜力的数据	375
23.4 陆地生态系统的食物供给潜力	375
23.4.1 农田生态系统	375
23.4.2 草地生态系统	377
23.4.3 林地生态系统	377
23.4.4 水生生态系统	381
23.4.5 中国陆地人口承载力	382
23.5 讨论	383
第 24 章 中国食物供给变化趋势	385
24.1 引言	385
24.2 耕地变化	385
24.2.1 退耕还林还草工程	385
24.2.2 城镇化	386
24.3 耕地食物产量及其变化	387
24.3.1 作物产量	387
24.3.2 食物营养产量	388
24.4 草地食物生产力	391
24.5 水产食物	393
24.6 进出口食物	394
24.7 人口供养能力分析	396
24.8 讨论	397
第 25 章 人口空间分布变化趋势与未来情景模拟分析	399
25.1 引言	399
25.2 人口分布曲面建模方法	400
25.3 人口增长态势分析	401
25.4 人口空间分布曲面建模方法	403
25.4.1 人口空间分布历史反演	403
25.4.2 未来情景模拟分析	409
25.5 讨论	415
第 26 章 结论与展望	416
参考文献	419

第一章 地球表面过程模拟的概念与问题

第一部分

HASM基本原理

1.1.1 地球表面过程模拟

地球表面过程模拟是指对地球表面各种物理、化学、生物、地质、水文、气象、生态等过程进行模拟。这些过程相互影响、相互制约，共同构成了地球表面的复杂系统。模拟的目的是为了理解这些过程的内在规律，预测未来地球表面的变化趋势，为人类的生产、生活提供科学依据。

地球表面过程模拟可以分为自然过程和人为过程两大类。自然过程包括水循环、碳循环、氮循环、磷循环、硫循环、生物地球化学循环等。人为过程包括土地利用变化、工业排放、农业活动、城市扩张等。模拟的方法可以分为数值模拟和物理模拟两大类。数值模拟是利用数学模型对过程进行模拟，物理模拟则是利用物理模型对过程进行模拟。

数值模拟是目前地球表面过程模拟的主要方法。它利用数学模型对过程进行描述，通过计算机求解模型方程，得到过程的时间序列或空间分布。数值模拟的优点是可以对复杂过程进行定量模拟，可以模拟各种尺度上的过程，可以模拟各种条件下的过程。数值模拟的缺点是模型方程的建立需要大量的观测数据，模型的求解需要大量的计算资源，模型的验证需要大量的观测数据。

1.1.2 地球表面过程模拟

地球表面过程模拟可以分为自然过程和人为过程两大类。自然过程包括水循环、碳循环、氮循环、磷循环、硫循环、生物地球化学循环等。人为过程包括土地利用变化、工业排放、农业活动、城市扩张等。模拟的方法可以分为数值模拟和物理模拟两大类。数值模拟是利用数学模型对过程进行模拟，物理模拟则是利用物理模型对过程进行模拟。

数值模拟是目前地球表面过程模拟的主要方法。它利用数学模型对过程进行描述，通过计算机求解模型方程，得到过程的时间序列或空间分布。数值模拟的优点是可以对复杂过程进行定量模拟，可以模拟各种尺度上的过程，可以模拟各种条件下的过程。数值模拟的缺点是模型方程的建立需要大量的观测数据，模型的求解需要大量的计算资源，模型的验证需要大量的观测数据。

第 1 章 地球表层建模的概念与问题

地球表层是岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的交界面,它包括上至大气对流层顶层,在极地上空约 8km,赤道上空约 17km,平均约 10km;下至岩石圈的上部,在陆地上深 5~6km,海洋下平均深 4km(钱学森,1983)。地球表层包括相互嵌套的 4 个空间尺度层次:局地(local)、区域(regional)、国家(national)和全球(global)。太阳辐射是地球表层的主要能源,地球接受的太阳辐射能总计 $1.73 \times 10^{17} \text{ W}$;太阳辐射能占地球表层所获取能量的 99.98%。太阳辐射能进入地球表层后推动大气循环,全球的大气环流模式就是能量稳定的对流传递的方式;太阳辐射能引起的水循环,带动了地球表层大量物质的循环运动,形成地形地貌的侵蚀堆积过程。有机体固定的太阳辐射能是地球表层全部生命运动的能量基础(浦汉昕,1983)。近年来,一些学者(周俊,2004;张猛刚、雷祥义,2005)将地球表层的空间范围外延为包括地球表面上下的岩石圈、水圈、大气圈、生物圈和近地物理(能量)场及其相关作用在内的地球空间,其下界为软流圈,其上界为大气圈最外层。

1.1 地球表层建模研究进展

1.1.1 地球表面形态表达

地球表面形态是地球表层研究的核心,它与人类活动、生物学、生物化学、地球化学、地质学、水文学、地貌学和大气动力学密切相关(Murray *et al.*, 2009)。地表起伏是几乎所有地理科学分析的一个关键参数(Dech, 2005)。数字地面模型和地形数据质量对认识地表过程尤为重要(Tarolli *et al.*, 2009)。

地表高程在空间受重力的约束,不可能无限大或无限小,地球表面一般服从唯一性、连续性、光滑性和有限性条件。对破坏光滑性条件的地形,如不连续性裂缝、悬崖、陡峰、窑洞和深渊等地表属性,可以作为个例进行特别处理。1937 年,de Gbaaff-Hunter 首先根据地面重力场描述了地表的形态。1965 年,Bragard 根据地表重力通过求解两个积分方程,计算了地球的表面形态。1977 年, Petrovskaya 探索了通过球谐函数中地势向地表外扩的广义化,构建了潜在膨胀的可能性。

由于高性能计算机和空间位置明确数据的局限性,在 20 世纪 80 年代之前的主要进展包括小尺度趋势面分析(Ahlberg *et al.*, 1967; Schroeder and Sjoquist, 1976; Legendre and Legendre, 1983)、数字地面模型(Stott, 1977)和地表逼近模拟(Long, 1980)。1993 年,牛文元应用均衡河流剖面的规律,从理论上推演了地表海拔-面积分布的宏观趋势。为了表达地球表面形态,俄罗斯科学院构建了 F 逼近法和 S 逼近法。地球表面形态的 F 逼近法基于线性积分的 Strakhov 方法(Strakhov *et al.*, 1999); S 逼近法基于谐和函数的基本公式(Stepanova, 2007)。谐和函数用于模拟全球定位系统可捕捉到位移发生时的地球表面(Ionescu and Volkov, 2008)。俄罗斯科学院将地球表面形态表达为 $z = f(x, y)$, 其中, z 为位置 (x, y) 处的海拔(Kerimov, 2009)。

1.1.2 地球气候系统模拟

地球气候系统可通过地球表层环境要素来表达。全球气候变化的原因包括地球生命中太阳常数的逐渐增加、板块运动、海洋环流、海平面变化、温室气体排放、地表反照率变化、轨道参数变化、火山爆发等随机事件及自然变异(Budyko and Izreal, 1991)。

地球气候系统研究可追溯到 20 世纪初。1904 年, Bjerknes 首次讨论了预测问题有理解的充分必要条件。

1905年, Ekman 发现了风对冰和水速的影响。1922年, Richardson 发表了他运用观测数据预测小范围气候的方法。1925年, Walker 讨论了南方涛动, 发现了包括东南太平洋高压和印度洋、西太平洋附近区域低压的交替气压型。1929年, Alt 研究了地球表层的热量平衡。1939年, Rossby 及其合作者发现了绝对涡度平流与大尺度波动的关系。在20世纪40年代后期的主要进展包括斜压和正压不稳定性理论(Charney, 1947)和等量正压分布概念(Charney and Eliassen, 1949)等。

1950年, Charney 等运用正压方程成功预测了24小时天气。1953年, 三层绝热准向地性模型被成功用于模拟1950年11月美国上空观测到的暴风雨发展过程(Charney and Phillips, 1953)。1956年, Black 模拟了太阳辐射在地球表面的空间分布。Phillips (1956)运用准地转近似方程进行了首次大气环流实验。1957年, Burdecki 分析了地表入射辐射和大气热力场。1957年, Chapman 在探测月球对地球大气引力的基础上, 发表了地球大气模型的思路。1958年, Mintz 提出了 Mintz-Arakawa 模型的基本思路, 这个模型包括太阳辐射的季节变化和长波冷却效应。1959年, Phillips 证明了非线性计算的不稳定性发生在非发散正压涡度方程的求解过程。

1969年, Arakawa (1969)提出了覆盖全球的两层垂直结构气候模型。1979年发表的第一个多层气候模型与两层模型相比, 有许多改进之处, 包括水平网格结构的调整、行星边界层模型的安装启用、增加了 Arakawa-Schubert 积云参数和臭氧混合率的预测(Schlesinger and Mintz, 1979)。1981年, Arakawa 和 Lamb (1981)发展了动量方程的水平差分。20世纪80年代后期到90年代后期, 气候模型的主要发展包括辐射方案的修正(Harshvardan *et al.*, 1987)、地形重力波拖曳参数化(Kim and Arakawa, 1995)、向下气流对积云参数化的影响(Cheng and Arakawa, 1997)、云液态水和冰的准确预测(Koehler *et al.*, 1997), 以及行星边界层多雨过程的修正(Li *et al.*, 1999)。

全球气候是由入射太阳辐射不均匀空间分布驱动以及大气圈、冰圈、水文圈、岩石圈和生物圈相互作用的结果(Stute *et al.*, 2001)。全球气候模型应聚焦于大气、海洋、陆地过程和海冰的相互作用。全球气候模型有许多尚未解决的理论问题(Washington and Parkinson, 2005)。例如, 由于对气溶胶的组成和空间分布知之甚少, 科学家仍然没有搞清楚气溶胶如何改变气候过程; 当厄尔尼诺现象和拉尼娜现象发生时, 海洋温度异常如何对气候产生影响; 火山爆发如何影响平流层中的臭氧量, 其冷却效应如何; 云-雨物理学尚不十分清楚; 云在辐射特性中发挥着非常重要的作用, 但我们对知之甚少; 现有气候模型的主要弱点是模拟垂直空气流动的能力很有限。Schiermeier (2010)指出, 政府间气候变化专门委员会(IPCC)的模拟结果对全球大部分地区冬季降雨在21世纪末如何变化没有提供任何具有说服力的预测; 更糟糕的是, 这些气候模型低估了已经发生的降雨变化, 这就降低了它们预测未来气候变化的可信度; 水的相变是地球气候的主要物理过程, 但这个过程在现有的全球气候模型中缺少很好的刻画。Makarieva 等(2010)的研究表明, 凝结所释放的潜能大约是全球太阳功率的1%, 类似于大气环流的固定耗散功率; 他们认为水汽的相变在驱动大气动态中发挥着远大于目前人们所认识到的作用。

1.1.3 生态建模

生物圈的生态建模始于19世纪中期, 但直到19世纪80年代之前, 数学在生物圈的应用几乎没有进展(Israel and Gasca, 2002)。1884年, 统计分析和初等定量技术开始被用于处理生物信息(Galton, 1884)。1916年, 概率论在先天病理形态研究中得到应用(Ross, 1916)。1920年, 逻辑斯蒂曲线被引入理论生物学(Pearl and Reed, 1920)。1925年, 统计方法在处理种群基因学问题中得到了发展(Fisher, 1925)。1926年, 常微分方程和积分微分方程被运用于建立生物群丛的理性力学(Volterra, 1926)。这一时期的生物圈建模过程可归纳如下: ①识别所研究自然现象的固有特性; ②用数学术语进行概括描述; ③用定性方法确定参数; ④将定量模拟结果与现实进行比较。在20世纪20年代后期和30年代初期, 自然选择和进化的数学模型开始兴起(Haldane, 1927; Wright, 1936)。然而, 这些特定的定量研究局限于小尺度系统和少数过程。

生物圈定量建模在经历第二次世界大战的间断之后, 于20世纪40年代后期逐渐复苏。定量方法不仅限于经典的生物统计方法和微分方程, 而且诸如对策论、系统论和信息论等新的数学工具也被用于建模研