



“地球大数据科学论丛”序

第二次工业革命的爆发，导致以文字为载体的数据量约每 10 年翻一番；从工业化时代进入信息化时代，数据量每 3 年翻一番。近年来，新一轮信息技术革命与人类社会活动交汇融合，半结构化、非结构化数据大量涌现，数据的产生已不受时间和空间的限制，引发了数据爆炸式增长，数据类型繁多且复杂，已经超越了传统数据管理系统和处理模式的能力范围，人类正在开启大数据时代新航程。

当前，大数据已成为知识经济时代的战略高地，是国家和全球的新型战略资源。作为大数据重要组成部分的地球大数据，正成为地球科学一个新的领域前沿。地球大数据是基于对地观测数据又不唯对地观测数据的、具有空间属性的地球科学领域的大数据，主要产生于具有空间属性的大型科学实验装置、探测设备、传感器、社会经济观测及计算机模拟过程中，其一方面具有海量、多源、异构、多时相、多尺度、非平稳等大数据的一般性质，另一方面具有很强的时空关联和物理关联，具有数据生成方法和来源的可控性。

地球大数据科学是自然科学、社会科学和工程学交叉融合的产物，基于地球大数据分析来系统研究地球系统的关联和耦合，即综合应用大数据、人工智能和云计算，将地球作为一个整体进行观测和研究，理解地球自然系统与人类社会系统间复杂的交互作用和发展演进过程，可为实现联合国可持续发展目标（SDGs）做出重要贡献。

中国科学院充分认识到地球大数据的重要性，2018 年年初设立了 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”（CASEarth），系统开展地球大数据理论、技术与应用研究。CASEarth 旨在促进和加速从单纯的地球数据系统和数据共享到数字地球数据集成系统的转变，促进全球范围内的数据、知识和经验分享，为科学发现、决策支持、知识传播提供支撑，为全球跨领域、跨学科协作提供解决方案。

在资源日益短缺、环境不断恶化的背景下，人口、资源、环境和经济发展的矛盾凸显，可持续发展已经成为世界各国和联合国的共识。要实施可持续发展战略，保障人口、社会、资源、环境、经济的持续健康发展，可持续发展的能力建



设至关重要。必须认识到这是一个地球空间、社会空间和知识空间的巨型复杂系统，亟须战略体系、新型机制、理论方法支撑来调查、分析、评估和决策。

一门独立的学科，必须能够开展深层次的、系统性的、能解决现实问题的探究，以及在此探究过程中形成系统的知识体系。地球大数据就是以数字化手段连接地球空间、社会空间和知识空间，构建一个数字化的信息框架，以复杂系统的思维方式，综合利用泛在感知、新一代空间信息基础设施技术、高性能计算、数据挖掘与人工智能、可视化与虚拟现实、数字孪生、区块链等技术方法，解决地球可持续发展问题。

“地球大数据科学论丛”是国内外首套系统总结地球大数据的专业论丛，将从理论研究、方法分析、技术探索以及应用实践等方面全面阐述地球大数据的研究进展。

地球大数据科学是一门年轻的学科，其发展未有穷期。感谢广大读者和学者对本论丛的关注，欢迎大家对本论丛提出批评与建议，携手建设在地球科学、空间科学和信息科学基础上发展起来的前沿交叉学科——地球大数据科学。让大数据之光照亮世界，让地球科学服务于人类可持续发展。

郭华东

中国科学院院士

地球大数据科学工程专项负责人

2020 年 12 月



序

数字地球是地球科学、空间科学、信息科学与计算机科学等多学科交叉融合孕育而成的新兴科学技术，代表了数据密集型地学计算、知识发现与科学认知的新范式。经过二十余年的持续发展，数字地球已成为推动地球系统科学进步、支撑全球可持续发展的关键技术领域之一，同时也是国家科技综合实力的重要体现。

为充分释放数字地球的应用潜力，亟须系统整合多源地理空间数据、资源环境与生态信息产品及相关模型资源，构建标准化、规范化的信息集成管理与服务体系。应立足中国国情，建立高效的数字地球运行管理机制，突破数据标准与共享壁垒，最终构建面向决策支持、科学研究与公众服务的可信数字地球技术支撑平台。

数字地球是以对地观测为核心手段，基于统一的三维空间参考框架，将地球作为一个有机整体进行动态呈现与研究的新型科学与技术体系。其核心目标是揭示地球表层系统各要素的状态、分布、演化规律及其相互作用机制，支撑对地球系统的全面认知与科学决策。新一代数字地球不仅是多学科交叉融合的创新平台，更是支撑国家可持续发展、提升科技自主创新能力、维护全球和平与安全的重要战略性基础设施。

当前，数字地球的发展正面临诸多核心挑战，尤其是在海量数据体系的有效性、易用性、可靠性、可维护性与安全性等方面仍存在多维瓶颈，现有技术难以充分支持科学数据的深度挖掘与跨领域融合应用。要突破这些制约，亟须构建面向分布式海量地球信息与服务模型的集成管理体系，形成科学、高效的地理信息与专题数据、产品、模型的综合集成与优化服务方法，研发相应的工具系统，制定切实可行的对策与解决方案。面向未来，应加快推进新一代数字地球科学平台建设，为地球大数据驱动的决策支持、科学发现与公众服务提供坚实的技术基础和支撑。

基于上述背景，范湘涛研究员等自 2000 年起从事数字地球技术系统研发工作，作为主要技术负责人研发了我国首个数字地球原型系统和国际上第一个数字地球科学平台，构建了数字地球系统的框架模型与技术方法，为我国数字地球系统建设的发展奠定了坚实基础。2018 年，这一基础性工作迎来重大发展机遇——



中国科学院正式启动 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”，设立了“数字地球科学平台”项目，作为该理论体系工程化实施的重要支撑平台，标志着我国数字地球研究进入系统化、平台化、规模化发展的新阶段。

“数字地球科学平台”项目面向国家宏观决策、交叉科学研究以及社会公众服务需求，构建了新一代数字地球科学平台，实现了地球大数据的高效集成管理与综合信息服务。该平台基于三种典型应用模式——综合分析 with 决策支持、主题分析与展示、分布式网络化服务，研发了跨平台、多终端的资源环境与生物生态主题综合分析 with 展示系统。平台具备沉浸式、自然交互、智能分析与科学决策支持等多项关键能力，显著提升了大规模空间信息的可用性与应用效率。数字地球科学平台不仅为多学科融合、大数据驱动的知识发现与技术创新提供了强有力的数据、计算与服务支撑，也面向资源、环境、生物、生态等关键领域，兼顾科学传播与公众服务，全面拓展了数字地球的应用深度与社会影响力。

《数字地球科学平台》系统梳理了全球数字地球领域在理论方法、技术体系与应用实践方面的最新研究进展，重点汇集并总结了“数字地球科学平台”项目五年来的核心创新成果。全书围绕“从理论到应用”的完整链条，深入阐述了平台的理论基础、关键技术、系统架构与典型应用，是一部聚焦数字地球科学平台的理论研究、技术开发与系统集成综合性科技研究报告。

该书作为我国数字地球领域的重要学术成果，不仅为相关理论与技术研究提供了系统参考，也为数字地球系统的研发与应用推广提供了实践借鉴。其出版对于加快我国数字地球科学体系建设、推动新一代数字地球技术发展具有重要的战略意义。

该书面向广大科研人员、政府决策部门、高校师生及相关技术从业者，具有较强的专业价值和实践指导意义，必将对我国数字地球科技创新能力提升与高层次人才培养产生深远影响。

郭华东

中国科学院院士

2024 年 12 月

前言

数字地球是地球系统科学与空间信息技术深度融合的产物，已上升为国家科技战略布局中的重要制高点。在全球数据呈爆发式增长的时代背景下，一场以数据驱动科学发现为核心的技术变革正加速推进。构建一个以大数据平台为基础、具备深度挖掘与综合分析能力的数字地球科学平台，不仅是实现地球系统现状评估、演化规律分析与未来趋势预测的关键技术支撑，更是推动资源、环境、生物与生态等领域科学发现、辅助政府科学决策、服务社会公众的战略必然。

本书结合国内外在数字地球理论、技术、系统与应用方面的研究进展，系统总结了“数字地球科学平台”项目的核心成果。内容涵盖平台的系统架构与核心技术框架、基础平台、后端资源服务体系，以及超高清可视化平台的软硬件环境等关键组成部分。书中详细介绍了一个集交互性与探索性于一体的“数据发现—数据生产—数据可视化—数据应用”数字地球系统集成与服务模式。该平台显著增强了地球大数据的可视化展示、综合分析与科学决策支持能力，为实现多学科协同分析、促进科学发现和提升决策效率提供了有力支撑。

本书共 7 章，系统阐述了“数字地球科学平台”在理论、技术、系统建设与应用示范等方面的研究成果与实践经验。

第 1 章由张兵、黄铭瑞、詹勤、朱俊杰共同撰写，主要介绍数字地球的基本概念、理论体系与核心技术，梳理了国内外数字地球系统的发展现状，并概述了数字地球科学平台的建设背景与核心内涵。

第 2 章由严珍珍、唐娉、陈正超、简洪登、赵旦谱、张正共同撰写，介绍了平台的整体系统架构与核心技术体系，重点包括数字地球科学信息产品生产体系、基础平台框架、资源管理与服务框架及网络化信息服务框架等关键内容。

第 3 章由简洪登、刘健、徐琛、单桂华、田东共同撰写，主要介绍数字地球基础平台的数据组织模型、标准规范体系、引擎与客户端设计、网络化信息服务系统及综合分析决策支持系统的设计。

第 4 章由台宪青、赵旦谱共同撰写，聚焦科学数据与模型的自动化管理，介绍了科学数据管理流程、模型集成与服务机制，以及数字地球资源管理方法。

第 5 章由杜小平、朱俊杰、单桂华、田东共同撰写，详细介绍了数字地球可



视化技术的发展现状与应用，涵盖可视化展示系统的软硬件环境建设及关键技术实现。

第 6 章由黄文江、唐娉、陈正超、张方方、张正、张弼尧、刘荣高、刘洋、孙晓共同撰写，重点介绍数字地球科学信息产品生产系统的功能模块与关键技术、标准化生产流程与处理算法，以及不同分辨率信息产品的生成方法。

第 7 章由范湘涛、刘健、简洪登、董莹莹、李俊生、王胜蕾、郑超磊、刘林毅、贺忠华、张少卿共同撰写，展示基于数字地球科学平台的综合集成与示范应用案例，体现平台在多领域融合与服务社会中的应用价值。

本书系“数字地球科学平台”项目（XDA19080000）的重要成果，项目的顺利推进得益于中国科学院 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”总体组和专家组专家的悉心指导与大力支持，在此谨致以诚挚的感谢。由于水平有限，书中内容尚存不足与疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2025 年 12 月

目 录

“地球大数据科学论丛”序

序

前言

第 1 章 数字地球系统概述	1
1.1 数字地球基本概念	1
1.1.1 数字地球概念的提出	2
1.1.2 数字地球的含义	3
1.1.3 数字地球的研究对象与内容	4
1.2 数字地球技术	5
1.2.1 对地观测技术	5
1.2.2 全球导航卫星系统	7
1.2.3 地理信息系统	11
1.2.4 空间信息基础设施	13
1.2.5 空间信息处理技术	14
1.2.6 数字地球三维可视化技术	16
1.3 数字地球系统发展	24
1.3.1 国外数字地球系统	24
1.3.2 国内数字地球系统	26
1.3.3 新一代数字地球系统	27
1.4 数字地球科学平台	28
1.4.1 数字地球科学平台的提出	29
1.4.2 数字地球科学平台的发展历程	30
参考文献	32

第 2 章 数字地球科学平台框架	36
2.1 数字地球科学平台系统架构	36
2.1.1 数字地球科学平台总体目标	36
2.1.2 数字地球科学平台基本框架	38
2.1.3 数字地球科学平台体系架构	39
2.2 数字地球科学平台核心技术	42
2.2.1 多源数据组织与管理	42
2.2.2 数据标准与数据服务	43
2.2.3 时空大数据与云计算	44
2.2.4 信息提取与人工智能	45
2.2.5 可视化与虚拟现实	45
2.3 数字地球科学信息产品生产体系	46
2.3.1 科学信息产品体系	46
2.3.2 科学信息产品生产体系	50
2.3.3 全球空间数据处理与信息产品生产系统	52
2.3.4 遥感大数据典型信息产品快速生产系统	55
2.4 数字地球基础平台框架	59
2.4.1 数字地球基础平台组件式软件架构	59
2.4.2 数字地球基础平台插件式管理框架	61
2.4.3 数字地球基础平台应用服务模式	63
2.5 数字地球资源管理与服务框架	64
2.5.1 多源科学数据资源集成管理架构	65
2.5.2 异构服务资源集成管理架构	67
2.5.3 科学资源价值评价与运维支撑架构	69
2.6 数字地球网络化信息服务框架	71
2.6.1 网络化信息服务系统架构	71
2.6.2 网络化信息服务系统服务模式	74
参考文献	76

第 3 章 数字地球基础平台与网络化信息服务	77
3.1 数字地球基础平台数据组织模型与标准规范	77
3.1.1 全球离散格网系统	77
3.1.2 数字地球模型的数据组织与管理	79
3.1.3 面向数字地球可视化的地球大数据汇聚标准规范	81
3.2 数字地球基础平台引擎	85
3.2.1 空间数据引擎	86
3.2.2 大数据计算引擎	88
3.2.3 可视化引擎	90
3.3 数字地球基础平台客户端	97
3.3.1 DESP Explorer 系统组成	97
3.3.2 DESP Explorer 功能模块	99
3.3.3 DESP Explorer 数字地球服务	112
3.4 数字地球网络化信息服务	114
3.4.1 统一认证	115
3.4.2 公众服务	117
3.4.3 科研服务	120
3.5 数字地球综合分析与决策支持	123
3.5.1 系统组成	123
3.5.2 多源数据接入与服务	125
3.5.3 模型在线计算与服务	126
3.5.4 可视化分析与服务	128
3.5.5 面向专题应用的综合分析与服务	131
参考文献	133
第 4 章 数字地球科学数据驱动与服务	135
4.1 “云”上数字地球科学数据管理特点	135
4.1.1 “云”上的数字地球特点分析	135
4.1.2 科学数据驱动与服务内涵	138

4.1.3 科学数据全生命周期管理内涵	139
4.2 科学数据自动化管理	140
4.2.1 科学数据集成管理与服务系统组成	141
4.2.2 科学数据混合集成与处理	149
4.2.3 科学数据分级分类存储与管理	153
4.2.4 面向数字地球的科学数据服务	155
4.2.5 科学数据价值评价与共享服务	158
4.3 科学模型集成管理与服务	161
4.3.1 科学模型集成管理与服务系统组成	161
4.3.2 科学模型开发集成规范	166
4.3.3 多源科学模型快速集成	168
4.3.4 异构模型资源适应性承载与运行	171
4.3.5 服务结构化描述与能力评价	175
4.4 数字地球资源管理	178
4.4.1 数字地球资源管理系统组成	178
4.4.2 “云”上科学数据访问控制	183
4.4.3 云环境下系统异常检测	185
4.4.4 科学数据动态优选	188
参考文献	193
第5章 数字地球信息综合展示系统	194
5.1 数字地球可视化展示系统	194
5.1.1 大型球体展示系统	195
5.1.2 超宽球带幕展示系统（弧幕系统）	197
5.1.3 小型可穿戴沉浸式可视化系统	199
5.2 地球大数据科学工程原型系统	200
5.2.1 原型系统总体设计	200
5.2.2 球体展示系统	202
5.2.3 弧幕展示系统	206

5.2.4 科普互动展示系统	206
5.3 地球大数据集成服务平台	213
5.3.1 集成服务平台展示环境总体设计	213
5.3.2 学科交叉协同融合平台	214
5.3.3 可持续发展大数据决策支持服务平台	218
参考文献	220
第 6 章 数字地球科学信息产品生产	221
6.1 数字地球科学信息产品生产系统总体设计	221
6.1.1 生产系统概述	221
6.1.2 生产系统架构	222
6.1.3 生产系统关键技术	228
6.2 标准数据产品生产	231
6.2.1 多源多尺度遥感影像自动几何归一化处理	231
6.2.2 云与云阴影检测	237
6.2.3 自动云区修补	244
6.3 中低分辨率信息产品	249
6.3.1 内陆水域遥感产品及其季节和年际变化分析	250
6.3.2 时序 NDVI 和 LAI 遥感产品及植被变化分析	253
6.4 中高分辨率信息产品	258
6.4.1 中高分辨率植被遥感产品及其林草应用	258
6.4.2 中高分辨率水体遥感产品及其环保应用	260
6.5 国产卫星高分辨率遥感信息产品	265
6.5.1 遥感大数据典型信息产品快速生产	265
6.5.2 米级分辨率全国地表要素信息产品	266
6.5.3 重点地区细粒度土地覆被分类产品	269
6.5.4 遥感大数据典型目标识别产品	273
参考文献	277



第 7 章 数字地球科学平台应用示范	279
7.1 自然灾害监测预警平台	279
7.1.1 台风灾害监测模拟	279
7.1.2 流域洪水模拟推演	282
7.1.3 地震灾害快速评估	287
7.1.4 森林火灾监测模拟	289
7.2 省市级 SDGs 综合示范三维平台服务	291
7.2.1 SDGs 综合示范三维平台总体框架	291
7.2.2 海南省 SDGs 综合决策支持平台	293
7.3 SDGs 专题应用示范案例	298
7.3.1 亚非沙漠蝗灾情时序监测	298
7.3.2 湖泊水体透明度动态变化监测与评价	301
7.3.3 遥感蒸散发时序产品支撑全球农作物水分利用效率变化评估	303
7.3.4 全球大气 CO ₂ 浓度变化对气候变化的响应	309
参考文献	313

第 1 章

数字地球系统概述

本章导读 自数字地球概念提出以来，国内外迅速掀起了相关研究的热潮，推动了数字地球理论和技术的持续发展。作为面向地球科学研究的重要数字平台，数字地球不仅服务于科研与决策，也日益融入公众生活，提供多样化的空间信息服务。

随着对地观测、计算机、虚拟现实、人工智能等前沿技术的快速演进，特别是在大数据的时代背景下，数字地球迎来了新一轮的发展机遇，迈入了新一代数字地球的发展阶段。

本章将从数字地球的基本概念出发，梳理其相关理论与关键技术的发展脉络，简要回顾数字地球系统的演进过程，并分析当前的发展现状，旨在为读者提供关于数字地球的整体认知与理论基础。

1.1 数字地球基本概念

数字地球概念最早于 1998 年在美国提出，之后在中国得到高度重视，并且发展步伐加快。1999 年，首届“数字地球国际会议”(International Symposium on Digital Earth, ISDE) 在北京召开，来自全球 30 个国家和地区的 400 余位科学家出席会议，共同探讨即将迈入 21 世纪的数字地球发展战略。会议发布了具有里程碑意义的《数字地球北京宣言》，该宣言为全球数字地球研究与发展奠定了重要基础，也为我国开展区域化、专业化的数字地球研究与建设营造了良好的学术生态环境。

本书以中国科学院 A 类战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”(the Big Earth Data Science Engineering Program, CASEarth) 中的“数字地球科学平台”

项目为基础，系统总结了数字地球相关的基础理论、技术体系与典型应用示范，深入探讨了数字地球的发展历程、关键技术演进及其在国家科技战略中的重要意义。

1.1.1 数字地球概念的提出

自人类进入航天遥感时代，关于“认识我们的地球”这一永恒主题的探索在理念与技术手段上都发生了深刻变革。具备航天技术能力的国家相继发射搭载各类传感器的对地观测卫星，源源不断地将蕴含地理坐标信息的地球空间数据传回地面。这些具备不同时间和空间分辨率的观测数据，广泛采集、存储、处理并展示了人类生存环境中的自然与文化现象。自 20 世纪 90 年代以来，如何以综合、全面的视角，借助数字化手段研究和表达我们赖以生存的地球，并最大限度地利用海量对地观测数据，一直是最具挑战性的课题之一。

1993 年，美国政府宣布实施“国家信息基础设施”（National Information Infrastructure, NII）计划，依托因特网构建一条面向全民的信息高速公路，旨在实现海量信息资源的共享与高效利用。NII 的实施为深入理解地球系统、充分利用地球空间数据提供了技术支撑，使“以数字方式认识和表达地球”成为可能。次年，美国签署行政命令，启动“国家空间数据基础设施”（National Spatial Data Infrastructure, NSDI）建设，通过整合和标准化地理空间数据资源，进一步夯实了数字地球发展的基础。这一系列信息与数据基础设施的建设，为真实地球空间信息在数字环境中的呈现与应用做好了全面准备。

1998 年，在信息技术迅猛发展的背景下，数字地球概念应运而生。时任美国副总统阿尔·戈尔在加利福尼亚科学中心开幕式上的演讲中首次提出该概念，构想融合地理信息系统、互联网、虚拟现实等多项高新技术，构建一个全面感知和理解地球的平台。在演讲中，戈尔以一位小女孩遨游地球的想象视角，描绘了一个基于地理坐标、多分辨率、三维动态表达的数字地球模型。该模型能够集成和展示与地球相关的各类信息，使用户无论身处何地，都能即时获取相关的地理、经济与人文数据，从而实现对地球任意区域的无缝感知。这一设想为科学家深入理解人类与其居住环境之间复杂的交互作用提供了前所未有的平台和数据支持（Gore, 1998）。

数字地球概念一经提出，便迅速引发全球广泛关注，成为社会各界的热点议题。我国对此也高度重视，在科技界积极开展相关研究与讨论的基础上，政府将数字地球提升至国家战略层面，提出建设统一国家公用信息网络的数字地球构想。该构想旨在构建一个整合国家经济信息、国土资源信息、长江流域监控系统等多个信息系统的综合性平台。通过研发与系统集成，推动信息资源的高效建设与协

同利用，为数字地球奠定坚实基础。

数字地球的建设具有深远的战略意义，已成为全球科技发展与地球认知的重要方向。众多学者对其重要性给予高度评价。北京大学李琦教授曾指出：“数字地球是继地理大发现和哥白尼、伽利略日心说之后，人类认识地球的又一次飞跃”（李琦和吴少岩，1999）。显而易见，数字地球不仅是对地球信息的全方位研究、表达、呈现与利用，更是一个庞大而复杂的系统工程。其实现过程远非任何单一政府、企业或科研机构所能独立完成，而需要全球科技界、政府组织、数据提供者与使用者等各方的广泛参与和协同合作。

数字地球的发展具有深远的历史意义。其提出不仅极大地推动了地球空间信息科学的进步，推进了测绘事业的现代化进程，还带动了计算机科学、海量数据存储、对地观测技术、互联网、元数据与大数据等关键技术及其重要应用领域的迅速发展。

在当今信息化时代背景下，数字地球的影响仍在持续扩展。可以预见，它将在多个层面持续推动国家地球信息技术体系的建设：科技与数据政策等法规的完善、新基建背景下网络与数据设施的升级、信息资源网络的系统化构建，以及相关算法、软件的国产化研发等。

1.1.2 数字地球的含义

从本质上看，数字地球是一种以数字化手段处理与地球相关问题的综合性技术体系。在戈尔提出的数字地球愿景框架下，国内外学者围绕其理论与方法开展了广泛研究。1998年，戈尔在演讲中指出，数字地球是一个可嵌入海量数据的、多分辨率的、三维真实地球表示模型。同年，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）、地质调查局（United States Geological Survey, USGS）等15个机构的45位专家在数字地球专题研讨会上进一步明确，数字地球是对真实地球的虚拟表达，整合了来自遥感、地图制图、人口、医学等多个领域的交互式数据，并按照统一的地理坐标标准进行嵌入。通过这一模型，人类可以充分利用其中整合的自然、文化与历史等多源异构数据，实现对地球系统的深层次理解与多维度应用。

在我国，数字地球不仅是一项科技倡议，更是一种时代号召，引发了科学界的广泛关注与深入探讨。早在1998年，中国科学院地学部 and 863计划信息获取与处理技术主题专家组先后召开了数字地球专题研讨会，围绕其内涵与发展路径进行了深入交流与研究。数字地球作为一个以信息高速公路为基础、以空间数据基础设施为依托的综合性概念，其本质是构建一个全球性的信息融合体系，用数字化方式表达与理解地球系统。数字地球是“把地球搬进实验室和计算机”，是一种

经济、高效、科学地表达地球信息的新范式。该理念涵盖两个层面的地球概念：一是自然、物质层面上的真实地球；二是以政治、军事、经济与文化等人类活动为核心的抽象地球。数字地球作为一个综合性数据系统工程，贯穿信息的获取、传输、处理、应用、可视化呈现与辅助决策等全过程。

需要强调的是，数字地球的概念与内涵并非静态，它随着科技进步和认知深化不断发展和演化。未来的数字地球将纳入更多类型的信息，覆盖更广泛的领域，其体系也将更加清晰、完善，为人类探索与理解地球提供更强大的支撑。

1.1.3 数字地球的研究对象与内容

数字地球是以地球为研究对象，以计算机技术为核心支撑的综合性技术系统，具有开放性、复杂性和高度集成等典型特征。作为一个巨系统，数字地球的发展依赖于信息的获取、组织与处理。其本质是 NII 与 NSDI 的高度集成（承继成等，2007），同时也是地球观测系统（Earth Observation System, EOS）和地球观测信息网络（Global Observation Information Network, GOIN）等多项国际技术体系的深度融合。数字地球的研究对象涵盖与地球系统相关的信息理论、信息技术以及信息应用模型等内容。作为一门新兴的学科分支，数字地球的研究体系通常划分为四大组成部分：基础理论、技术体系、应用领域与工程体系。这四个维度共同构建了数字地球的理论基础和技术架构，体现了其系统化、集成化和多学科融合的特性。

数字地球的基础理论研究聚焦于地球信息理论与地球系统理论，特别关注地球系统非线性与复杂性特征的理论研究。具体而言，地球信息科学的基础理论包括地球信息的形成机制，涉及地球科学中的信息论、3S（遥感、地理信息系统与全球导航卫星系统）技术、信息流与信息场、能量信息、图形信息以及信息存储与管理等。

数字地球的技术体系研究则涵盖图像信息科学、面向对象理论、关系数据库理论、空间数据模型理论、信息综合模型理论和空间关系理论等关键内容，为数字地球系统的构建与数据处理提供基础。

在应用层面，数字地球涉及广泛的地球科学与信息科学交叉研究内容，如地理信息系统中的自组织理论、自相似理论、整体性与分异性理论、空间结构与空间功能理论、熵理论、生态承载力理论、突变与混沌理论以及可持续发展理论等，为数字地球的实际应用提供理论支撑。

最后，数字地球工程体系聚焦于现代信息技术的集成应用，涉及科学计算、高速互联网、云计算、大数据处理、可视化技术和虚拟现实等前沿技术，为数字地球的实现和运行提供技术支持。

1.2 数字地球技术

数字地球为全面认知与了解地球提供了有效的方法，其理论基础包括地球信息理论和地球系统理论。数字地球的关键技术涵盖了地表原始数据的获取、存储、管理、分析、建模、仿真与虚拟现实等方面，并包括支持这些技术的数据传输、发布与共享。总体而言，这些技术可概括为：对地观测技术、全球导航卫星系统、地理信息系统、空间信息基础设施、空间信息处理技术、数字地球三维可视化技术等。

1.2.1 对地观测技术

对地观测是以地球为观测对象，利用航空航天平台和地面平台上的光电仪器，通过可见光、红外、微波、射频等多个探测谱段，对地球环境及人类活动进行监测，以获取信息并进行处理，最终形成有价值的产品。这一技术起源于 20 世纪 80 年代中期，当时美国为了支持空间站的建设，成立了对地观测系统科学与飞行任务研究小组，提出了涵盖“陆地、海洋、气候、大气、生物化学循环、水文循环”六大基本观测任务，并确定了低轨道地球观测的基本需求。对地观测的主要研究方向包括地球物理、气候过程、生物化学和水文等领域，旨在监测和评估自然与人造环境的状态和变化。

对地观测以遥感技术为核心，标志着现代遥感技术的重大进展。1962 年，“遥感”一词首次在国际科技界得到认可，正式开启了人类利用遥感技术进行地球空间观测的时代。遥感技术的基本原理是将不同性能的观测仪器载于各类平台，送入距离地球一定高度的位置，对地表进行观测，并将数据传回地面。通过地面接收系统的接收、解码和分析处理，遥感技术能提取有价值的信息，为深入了解地球、合理开发利用资源及保护地表环境提供强有力的技术支持。

在遥感技术体系中，用于接收目标反射或辐射电磁波的设备称为遥感器；搭载遥感器的移动平台则被称为遥感平台，主要包括飞机、人造卫星及地面观测装置。通常，将搭载在飞机上的平台称为航空遥感平台，而搭载在卫星上的平台称为航天遥感平台。遥感过程主要涵盖信息获取、在轨处理、信息存储与传输、地面接收与处理、应用分析、定标校准、真实性验证，以及基础研究与应用研究等多个环节。遥感技术的核心原理是通过探测地物反射或辐射的电磁波信号，实现对地表目标及其特征的识别与解析。由于物体种类及环境条件的差异，不同物体反射或辐射的电磁波波长存在差异。遥感技术正是利用地物对电磁波的固有反射与辐射特性，通过观测这些电磁波信号，从而识别物体及其所处的环境状态的。

不同辐射源产生的电磁波波长各异，且变化范围广泛。将各种电磁波按照波长或频率的大小依次排列，便形成了电磁波谱。当前遥感探测主要利用的电磁波谱段包括紫外线（ $0.3\sim 0.4\mu\text{m}$ ）、可见光（ $0.4\sim 0.7\mu\text{m}$ ）、红外线（ $0.7\sim 14\mu\text{m}$ ）以及微波（ $1\text{mm}\sim 1\text{m}$ ）波段。可见光主要来源于物质外层电子的激发与跃迁；红外线的产生源于物质分子和晶格的振动；而波长更长的微波主要由物质分子的旋转与反转运动，以及电子自转与磁场相互作用引起。

对地观测所使用的传感器按工作方式可分为被动遥感和主动遥感两大类，按成像方式则分为摄影类传感器、扫描成像类传感器、雷达成像类传感器及非图像类传感器。摄影类传感器的工作原理与普通照相机类似，通过镜头直接成像。扫描成像类传感器则通过逐点逐行的时间序列扫描获取二维图像，是目前应用较为广泛的一类传感器。扫描成像类传感器又可细分为对物面扫描成像仪和对像面扫描成像仪。对物面扫描成像仪包括红外扫描仪、多光谱扫描仪、专题制图仪（thematic mapper, TM）及增强型专题绘图仪（enhanced thematic mapper plus, ETM+）等；对像面扫描成像仪则先在像面上瞬间形成一条线图像或二维影像，随后对其进行扫描，如高分辨率可见光（high resolution visible, HRV）线阵列推扫式成像仪。成像雷达是一种主动遥感传感器，通常从侧视角度向地物发射电磁波。目前广泛使用的合成孔径雷达（synthetic aperture radar, SAR），通过合成孔径技术实现高分辨率成像。

对地观测卫星通常在距离地球 $700\sim 900\text{ km}$ 的轨道上运行，而部分气象卫星则在约 36000 km 的轨道上运行，与地球保持相对静止。根据世界经济论坛 2020 年 10 月的数据，目前在轨运行的对地观测卫星共有 446 颗，占有在轨卫星的 27%（Wood, 2020）。这些卫星搭载了多种仪器载荷，覆盖大气、海洋和陆地等地球系统的全面观测，支持数百种与人类生活密切相关的应用。美国是全球卫星发射数量最多的国家，俄罗斯、法国、意大利、德国等国均为主要卫星发射大国，发射数量各在 $25\sim 50$ 颗。中国和印度则是亚洲地区重要的卫星发射国家。

对地观测卫星能够在一定时间内实现对全球的全面覆盖，或对特定区域进行定点观测。由于卫星多沿近圆形轨道运行，所获取的全球图像在空间尺度上具有一致的比例尺。当卫星沿近极地轨道运行时，能够覆盖更广阔的地面范围；而沿太阳同步轨道运行，则有助于卫星在相似光照条件下进行连续观测。长期运行的对地观测卫星可以获取同一地区不同时期的影像数据，为地表环境变化和自然现象的动态监测提供了重要支持。

利用飞机、气球、飞艇等空中平台进行地面观测的遥感技术体系称为航空遥感。与对地观测卫星相比，航空遥感平台在飞行时间和区域上受限较少，任务执行更加灵活。由于距离地面较近，航空遥感获取的图像在空间分辨率方面具有显

著优势，能够与星载遥感形成有效互补。航空遥感平台的飞行高度因平台性能而异，一般航空遥感飞机的标准作业高度为 4500~14000m（张兵，2018）。

新一代对地观测系统将具备高度智能化特征，能够全面整合“空-天-地”多源传感器，实现全球范围的测量与实时地球环境监测。在大数据和云计算技术及相关基础设施的支持下，系统将提供更强大的超级计算能力和创新的分析范式。通过采用先进的数据管理技术，有效兼容历史数据与实时数据，促使更多专家和普通用户参与到对地观测及相关服务中（Zhou, 2003；李德仁和沈欣，2005；秦奇等，2021）。

1.2.2 全球导航卫星系统

全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）主要包括美国的全球定位系统（global positioning system, GPS）、俄罗斯的格洛纳斯导航系统（global navigation satellite system, GLONASS）、欧盟的伽利略导航卫星系统（Galileo navigation satellite system, GALILEO）以及中国的北斗卫星导航系统（BeiDou navigation satellite system, BDS）（Hein, 2020）。这些系统均具备全球覆盖能力，能够实现全天候、全天时的定位与导航服务。GNSS 不仅能够提供精确的平面位置和地理坐标，还能实现高程与海拔等垂直方向的测量，从而广泛应用于交通运输、地理测绘、农业、军事等多个领域。

1. 美国 GPS

GPS 是由美国国防部于 1973 年启动并实施的一项全球性战略性工程，旨在为美国海、陆、空三军提供实时、全天候、全球覆盖的高精度导航与授时服务，兼具情报收集、核爆监测与应急通信等功能。经过二十余年的研发与试验，该系统于 1994 年完成建设，成功部署了由 24 颗卫星组成的星座系统，全球覆盖率高达 98%。这一系统的建成标志着现代导航技术的一次革命性突破。GPS 可提供标准定位服务。在双频工作条件下，其定位精度可达 20 m，授时精度提高至 40ns。该系统具备全天候、连续、高精度的定位能力，广泛应用于海、陆、空以及近地空间等多种场景。

GPS 由空间部分、地面控制系统和用户设备组成。其空间部分由 24 颗中轨道卫星组成，轨道高度约 20200 km。其中 21 颗为工作卫星，3 颗为备用卫星。所有卫星分布在 6 个轨道面中，每个轨道面上布设 4 颗卫星，相邻轨道面夹角为 60°，轨道倾角为 55°，运行周期为 11 小时 58 分钟。这种布设确保了地球上任意地点在任意时刻至少可接收 4 颗卫星信号，最多可达 11 颗。这些 GPS 卫星持续向地面发射无线电信号，主要覆盖三个频段：1575.42MHz（L1）、1227.60MHz（L2）

和 1176.45MHz (L5)。其中, L1 频段信号调制有粗/捕获码 (C/A 码)、精密码 (P 码) 以及导航电文, 广泛用于用户的测距和定位; L2 频段信号调制有 P 码和导航电文, 主要用于提高定位精度; L5 频段则主要用于提供更高精度的定位信息, 具备更高的抗干扰能力。

地面控制系统包括 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监控站。主控站设在美国科罗拉多州的联合空间执行中心, 负责数据采集、星历计算、导航电文编算、状态诊断和卫星调度等。注入站分布于大西洋、太平洋和印度洋的美国军事基地, 负责向卫星上传修正参数。5 个监控站分布全球, 包括夏威夷等地, 负责全天候采集各可见卫星数据, 每 6 秒进行一次伪距和多普勒测量, 同时采集气象信息并监控卫星运行状态, 所有数据最终传输至主控站。

用户设备包括 GPS 天线、接收机、电源、控制与显示器终端及数据处理软件等, 功能是接收卫星信号、译解导航电文, 并实时计算用户三维位置、速度和时间信息。自 1990 年海湾战争以来, 美军 GPS 用户装备经历了从箱式整机到板卡式, 再到模块化结构的技术演变, 逐步实现了通用化、系列化与模块化, 形成了结构简洁、功能实用的用户终端。第一代用户设备为箱体式单频接收器, 体积大, 通道数少, 密钥依赖物理介质加注。第二代设备采用开放式架构, 内置抗欺骗安全模块, 显著提升了系统的安全性与管理效率。第三代设备进一步强化了安全保障能力, 提升了芯片集成度与模块通用性, 形成具备核心导航处理功能的通用化 GPS 模块, 实现了更高效、更安全、更易部署的用户终端。

2018 年, 美国成功发射首颗 GPS III 卫星, 标志 GPS 正式迈入全面升级的新阶段。未来, GPS 用户设备的总体发展趋势将朝向单芯片系统方向演进, 具备多 GNSS 系统信号接收能力以及更高的安全性与密码保障能力。

2019 年, 美国启动将 GPS 星座纳入军事空间架构重组的计划, 着手开发具有通用接口、可重新编程的有效载荷以及在轨抗干扰能力的模块化卫星平台。同时, 美国空军研究实验室推动的在轨数字波形生成器与“导航技术卫星-3”项目 (刘春保, 2017), 旨在开发具有可重新编程的数字化导航有效载荷, 以增强未来 GPS 在复杂电磁环境中的安全性与灵活性 (熊超等, 2021)。

尽管 GPS 最初为军事目的而研制, 其应用范围已远超初衷。目前, GPS 已广泛应用于海、陆、空交通导航与管理, 土地测绘, 航空摄影, 遥感, 地震监测, 卫星测轨, 物体姿态角测定, 电离层与电磁波传播研究, 时间同步与全球环境监测等多个领域, 成为现代社会信息基础设施的重要组成部分。

2. 俄罗斯 GLONASS

为实现全天候、全天时的导航与定位服务, 苏联于 20 世纪 70 年代末提出建

设 GLONASS 的设想，并于 1982 年成功发射首颗 GLONASS 导航卫星。至 1996 年，完成了由 24 颗卫星组成的第一代 GLONASS，实现全球覆盖能力，并向军方用户提供导航与定位服务。苏联解体后，俄罗斯继承了 GLONASS 的管理与运营权，并于 2003 年开始部署新一代 GLONASS-M 导航卫星，在增强系统稳定性的同时提升了信号性能。2007 年，俄罗斯正式宣布将定位精度可达 10m 的 GLONASS 信号向全球民用用户开放，标志着该系统的服务范围由传统的军事用途拓展至全球民用市场，成为继 GPS 之后又一面面向公众开放的全球卫星导航系统（陈鹏，2021）。

GLONASS 同样由空间部分、地面控制系统和用户设备组成。其空间部分由 24 颗导航卫星组成，运行在 3 个倾角为 64.8° 的轨道面上，每个轨道面均匀分布 8 颗卫星，卫星位于距离地面约 19100km 的中地球轨道上，轨道周期约为 11 小时 15 分钟 44 秒。该布设方案能够实现对全球任意地点的连续覆盖。

地面控制系统包括控制中心、中央同步器、遥测遥控站（含激光跟踪站）以及其他外场导航控制设备。苏联解体后，地面控制系统集中于俄罗斯境内，其中控制中心与中央同步器位于莫斯科，遥测遥控站分布于圣彼得堡、捷尔诺波尔、埃尼谢斯克和共青城等地。

用户设备主要由接收机构成，其任务是接收导航卫星所发射的信号，测量伪距及其变化率，并从中提取导航电文。接收机内部处理器对接收到的数据进行处理，计算出用户的三维位置、速度和时间信息。

2011 年，俄罗斯成功发射了首颗 GLONASS-K1 导航卫星，标志着 GLONASS 迈入现代化升级阶段。2023 年，新一代 GLONASS-K2 卫星成功发射，作为 GLONASS 现代化的重要节点，GLONASS-K2 在信号体制与性能指标方面均实现了显著提升，为系统整体精度、可靠性与兼容性带来了实质性增强。

GLONASS 采用军用与民用双重服务模式，为不同类别用户提供定位与导航能力。面向军用用户，系统通过加密信号传输，具备更强的抗干扰能力与高精度定位性能，以满足国防安全需求；面向全球民用用户，系统则主要提供开放式信号服务，可广泛应用于交通运输、测绘地理、通信、电力调度等领域，保障全球用户在多种环境下获取稳定、可靠的定位、导航与授时信息。

3. 欧盟 GALILEO

GALILEO 是欧盟于 1999 年启动的全球卫星导航定位系统，由欧洲航天局（European Space Agency, ESA）负责建设与运营，旨在构建一套独立于美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS 的民用导航系统，以增强欧洲在经济、政治和技术领域的自主性。GALILEO 计划分为四个阶段：论证阶段（2000~2001 年）、系统研制与在

轨验证阶段(2001~2005年)、星座部署阶段(2006~2007年)以及运营阶段(2008年至今)(程鹏飞等, 2003)。该系统由卫星星座、地面控制系统和用户终端三大部分组成。

星座部分规划由 30 颗轨道高度为 22322km 的中轨卫星组成, 其中包括 24 颗工作卫星和 6 颗备用卫星。卫星分布在 3 个轨道面上, 每个轨道面倾角为 56° , 各自布设 10 颗卫星(其中 1 颗为备用卫星)。单颗卫星的运行周期为 14 小时 4 分钟, 地面重复轨迹周期为 10 天。系统于 2019 年实现完全运行能力, 目前已有 24 颗卫星在轨运行。

地面控制系统由监控系统、轨道测控系统、时间同步系统和系统管理中心组成。系统设有两个位于欧洲的控制中心, 配套部署有 29 个遍布全球的伽利略传感器站、5 个 S 波段上行站和 10 个 C 波段上行站, 用于实现控制中心与卫星之间的数据交换。此外, 地面系统还支持与用户服务中心的接口连接, 提供增值商业服务和搜救服务等多项功能。

用户终端主要由接收机及其相关产品构成。考虑到系统兼容性和互操作性需求, GALILEO 设计时已将 GPS 和 GLONASS 导航信号纳入兼容范围, 因而其接收机多为多模、多用途设备, 可支持多种 GNSS 信号的联合使用。

GALILEO 提供多种服务类型, 核心为面向大众的公开服务, 涵盖定位、导航与授时功能。在此基础上, 系统还提供增值的商业服务, 支持加密导航数据的分发, 满足专业领域对高精度测距和定时的需求。此外, GALILEO 还提供生命安全服务, 通过接入国际卫星搜救系统, 具备全球搜索与救援能力, 增强紧急响应效率。

4. 中国 BDS

BDS 是中国自主建设并独立运行的全球卫星导航系统, 面向全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航与授时服务。自 2021 年正式提供全球服务以来, BDS 已成为联合国认定的 GNSS 四大核心供应商之一。

该系统于 1994 年立项, 中国由此开始探索适合自身国情的全球卫星导航发展路径。当时, 美国的 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 均已完成由 20 余颗卫星组成的全球组网。BDS 确立了“分步实施、逐步覆盖”的三步走发展战略: 2000 年底建成北斗一号系统, 实现对中国的初步服务; 2012 年底建成北斗二号系统, 覆盖亚太地区; 2020 年建成北斗三号系统, 全面提供全球服务(武中奇, 2021)。

BDS 系统由空间段、地面段和用户段组成, 具备全球范围内全天候、全天时提供高精度、高可靠性的定位、导航与授时服务能力。系统同时具备短报文通信功能, 是其区别于其他全球卫星导航系统的重要特征之一。根据早期研究, BDS