

第二版前言

自世界上第一个地理信息系统(GIS)于 20 世纪 60 年代在加拿大诞生以来, GIS 技术经历了 60 多年的快速发展。GIS 从原来局限于地理研究和土地测绘等政府部门的小范围应用, 发展到现在被各学科、各行业部门和企业广泛使用。其发展趋势也经历了从强调“系统”本身的功能到强调推动技术发展的“科学”, 再到现在的为大众普及“服务”的侧重点的转移。这些变化一方面归结于计算机硬件性能的大大改善(如 CPU 速度和存储容量呈指数级的加速和增大)和计算机科学与技术的快速发展(包括数据库技术、Window 操作系统、基于对象的编程语言、遥感图像处理、人工智能等的出现和发展), 另一方面归结于日益拓宽的应用领域及其日常需要处理的信息量呈爆炸式的增长(包括从卫星遥感快速监测获取的海量信息)。近年来 Internet 技术的发展使得 GIS 可以为公众提供一种快捷和方便的服务。同时, 最近大模型空前的“热度”, 都可能对空间分析带来潜在和深远的影响。这些科学技术的发展, 势必对空间分析的有关方法带来新的挑战 and 机遇, 促使人们从新的视角去理解空间分析的有关功能。

但无论 GIS 如何变化, 对空间信息进行处理和分析一直是 GIS 的核心和重要功能之一。GIS 具有的强大空间分析功能, 是其区别于计算机制图系统和数据库管理系统的显著特征之一。GIS 的应用不能停留在空间数据的录入、修改、查询和显示等初始阶段。人们希望从海量的数据中提取有价值的知识和信息, 即找出数据之间的关系, 并分析其中的原因, 还要根据现有的数据预测未来的发展趋势。因此, 英国的 Openshaw 提出了地学计算概念, 认为它是 GIS 在 21 世纪的前沿性研究领域, 是 21 世纪的“后 GIS”(post-GIS)发展的产物。GIS 储存了大量的空间数据, 其隐藏了许多有用的信息。GIS 空间分析正是从 GIS 数据库挖掘出知识的最重要的工具之一。

可以这么理解, 空间分析是基于地理学的三大定律来进行的。当前, 地理学第一、二定律基本为地理学术界所认可。地理学三大定律刻画了地理现象空间分布的核心特征, 即空间自相关特征、空间异质性特征和地理相似性特征。现有的空间分析方法基本可以对应于上述地理学三大定律。借助 GIS 空间分析, 能回答地理学的一系列复杂问题: ①可发现空间数据中内在的、隐含的空间关系、空间模式和空间规律; ②为已有的问题寻找答案和结果; ③检验和证实已有的论点和假设; ④从空间数据中找到满足某些应用的新理论、新观点和普适性的方法。GIS 空间分析的目的就是完成对空间数据的分析操作, 得到分析结果, 应用到实际问题中。空间分析所涉及的应用主要有查询操作、推理操作、量算、描述和总结操作、情景模拟与分析。GIS 空间分析的一个特有操作是: 针对空间数据, 根据一定的模型或者地理学原理来验证假设和获取知识。

GIS 空间分析是一个不断发展的领域, 人工智能(AI)和空间分析的不断深入融合将会导致前所未有的变革。从自动化地图制作到复杂的空间数据分析, 再到智能地理空间决策支持系统, AI 的介入不仅加速了 GIS 的发展, 也极大扩展了其应用领域和深度。地理空间人工智能(geospatial artificial intelligence, GeoAI)是指地理空间科学与人工智能相结合的交叉学科研究方向, 通过研究与开发机器的空间智能, 提升对于地理现象和地球科学过程的动态感知、智能

推理和知识发现能力,并寻求解决人类和地球表面环境系统相互作用中的重大科学和工程问题。GeoAI 是一个新兴领域,它将 AI 的技术和方法应用于地理空间数据分析,以解决复杂的地理、环境和空间问题。GeoAI 在 GIS 空间分析与制图中具有广泛的应用前景,如时空大数据挖掘与分析、复杂制图过程的决策推理、地图空间模式的智能化认知等。

GeoAI 正日益成为地理空间科学领域的关键驱动力,通过应用于空间数据智能特征提取、增强空间分析、构建知识图谱、实现空间数据的实时处理,以及加强空间预测与决策支持,它正在重新定义我们对地理空间信息的理解和利用方式。这些进步预示着我们将能够以更高的精度模拟和预测气候变化、城市扩张、自然灾害和资源分布等复杂地球系统的动态。尽管 GeoAI 的潜力巨大,但它在实际应用中还面临着几个重要的挑战。首先,高质量的地理空间标注数据相对有限,这制约了模型训练的有效性。其次,GeoAI 模型的可迁移性和解释性通常较弱,这限制了它们在不同地理环境中的应用和用户对模型决策过程的理解。再次,当前的 GeoAI 技术在地理空间语义分析和推理能力方面还有待加强,这影响了它们对复杂空间关系和模式的识别和解释能力。最后,数据隐私和安全始终是应用 GeoAI 技术时需要重视的问题,特别是在处理包含敏感位置信息的空间数据时。未来,随着 GeoAI 技术的不断发展和 GIS 数据量的持续增长,GeoAI 与 GIS 数据的深度融合将引发一场变革。这场变革不仅将进一步提升人们分析和理解地理空间信息的能力,还将扩大人们对地球表面现象进行处理、分析和预测的能力。通过克服现有挑战,GeoAI 将在 GIS 空间分析中扮演更加关键的角色,帮助人们更精确地捕捉和预测地球系统的变化,为应对气候变化、城市规划、灾害管理和资源优化等全球性挑战提供支持。

本教材对 GIS 空间分析的基本方法进行了系统的介绍,包括基于地理对象的位置和形态特征的空间数据分析技术;对地理现象的位置、形态、空间布局进行分析,如寻找适宜位置、计算成本距离等;还包括对空间关系和空间过程进行研究,如识别空间关系,获得它们的内在规律,特别是获得隐含的空间信息;进一步介绍了 GIS 空间分析的前沿性研究,包括探索性空间分析、空间知识挖掘和地理元胞自动机与情景模拟等。这些空间分析方法有助于对地理现象的格局和分布规律的认识,也促进了对其复杂过程的理解,尽管完全掌握与过程有关的规律是十分困难的。

本教材得到了华东师范大学精品教材建设专项基金的资助。多位研究生同学在本教材的写作过程中帮助收集和整理资料等。其中,邓昊键、闻馨、余楚滢、刘燕君等为第 8 章的写作提供了极大的帮助,他们负责准备了练习数据和操作步骤。李文炜、夏艺菲参与了本书的部分校对工作。梁迅老师具体对元胞自动机模型和未来土地利用情景模拟软件进行了核实检查。

由于时间仓促、作者水平有限,本教材中难免会有一些疏漏之处,殷切希望广大同行、读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2025 年 12 月于上海

目 录

第二版前言

第 1 章 GIS 简介	1
1.1 GIS 的概念	1
1.1.1 G	1
1.1.2 I	2
1.1.3 S	2
1.1.4 GI	2
1.1.5 IS	3
1.1.6 GIS	3
1.2 GIS 的组成、基本功能和应用	3
1.2.1 GIS 的组成	3
1.2.2 GIS 的基本功能	5
1.2.3 GIS 的应用	6
1.3 GIS 发展方向	8
1.3.1 网络化	8
1.3.2 组件化	9
1.3.3 标准化	9
1.3.4 多维化	9
1.3.5 商业化	9
1.3.6 大众化与信息服务	10
1.3.7 开源 GIS	10
1.3.8 GIS 与人工智能	10
参考文献	11
第 2 章 GIS 空间分析的意义和内容	12
2.1 空间分析的概念与发展	12
2.1.1 空间分析的概念	12
2.1.2 空间分析的历史与发展	12
2.2 空间分析的研究内容与理论基础	14
2.3 空间分析模型与数学基础	16
2.3.1 空间模型与空间分析模型	16
2.3.2 数学基础	17
2.4 GIS 空间分析的主要步骤	17
2.4.1 明确分析目标和分析要求	17
2.4.2 准备空间分析的数据	18
2.4.3 执行空间分析操作	18

2.4.4	准备表格分析数据	18
2.4.5	属性表分析	18
2.4.6	获得分析结果	18
2.4.7	评价和解释分析结果	18
2.4.8	修改分析过程	19
2.4.9	输出专题图和报表结果	19
	参考文献	19
第3章	GIS 基础	21
3.1	GIS 数据及元数据	21
3.1.1	空间数据和属性数据的概念	21
3.1.2	元数据	22
3.1.3	GIS 数据的获取和采集	23
3.2	GIS 属性数据的一般统计分析	25
3.2.1	属性数据的集中特征	25
3.2.2	属性数据的离散特征	26
3.2.3	属性数据的分类分级	27
3.2.4	属性数据的图表分析	27
3.2.5	属性数据的综合评价	29
3.3	基于矢量数据结构的 GIS	31
3.3.1	矢量数据的获取方式	31
3.3.2	点、线、面要素的矢量表达方法	32
3.3.3	矢量数据模型及拓扑关系	32
3.3.4	矢量数据结构的主要编码形式	34
3.4	基于栅格数据结构的 GIS	36
3.4.1	栅格数据的图形表示	36
3.4.2	栅格数据的获取方式	37
3.4.3	栅格数据结构的组织及编码方法	37
3.4.4	矢量数据结构和栅格数据结构的优缺点比较	41
3.5	GIS 空间数据库	42
3.5.1	数据库的概念	42
3.5.2	数据库系统的数据模型	44
3.6	空间分析的一般模型	47
3.6.1	空间分布分析模型	48
3.6.2	空间关系模型	48
3.6.3	空间相关分析模型	49
3.6.4	预测、评价与决策模型	50
	参考文献	50
第4章	GIS 空间分析基础方法	51
4.1	空间度量	51
4.1.1	几何量算	51

4.1.2 质心量算	52
4.1.3 形状量算	53
4.2 叠置分析	55
4.2.1 基于矢量数据的叠置分析	56
4.2.2 基于栅格数据的叠置分析	57
4.3 缓冲区分析	60
4.3.1 矢量数据的缓冲区分析	60
4.3.2 栅格数据的缓冲区分析	61
4.4 空间插值	62
4.4.1 泰森多边形法	63
4.4.2 反距离加权法	64
4.4.3 多项式拟合曲面法	65
4.4.4 三角网/线性插值法	65
4.5 数字高程模型分析	65
4.5.1 数字高程模型简介	65
4.5.2 DEM 数据的采集和表示方法	66
4.5.3 常用的 DEM	67
4.5.4 DEM 在地图制图与地学分析中的应用	70
4.6 网络分析	71
4.6.1 网络模型的相关概念	71
4.6.2 常见的网络分析方法	72
4.7 探索性空间数据分析	74
4.7.1 EDA 和 ESDA 的简介	74
4.7.2 ESDA 的图形方法	74
4.7.3 ESDA 的数学方法	76
4.8 区位-配置模型	77
4.8.1 区位-配置模型的基本概念及原理	78
4.8.2 区位-配置模型和算法	79
4.9 空间多准则决策分析	83
4.9.1 空间多准则决策分析与 GIS	85
4.9.2 评估准则	87
4.9.3 决策方案与约束	89
4.9.4 标准权重的确定	91
4.9.5 决策规则	97
4.9.6 敏感性分析	100
4.10 地统计分析	102
参考文献	105
第 5 章 基于地理学定律的地理建模与分析	107
5.1 地理学三大定律	107
5.1.1 地理学第一定律理论	107

5.1.2 地理学第二定律理论	107
5.1.3 地理学第三定律理论	108
5.1.4 三大定律的联系与区别	108
5.2 回归分析与地理加权回归	110
5.2.1 一元线性回归分析	110
5.2.2 多元线性回归分析	112
5.2.3 非线性回归分析	113
5.2.4 趋势面分析	114
5.2.5 地理加权回归分析	116
5.3 景观格局分析	119
5.3.1 景观格局的有关概念	119
5.3.2 空间自相关分析	120
5.3.3 常用的景观格局指数	120
5.4 地理探测器	124
5.4.1 地理探测器原理	124
5.4.2 参数最优的地理探测器	126
5.4.3 地理探测器实现方法	126
5.5 案例推理分析	127
5.5.1 基于案例推理方法的基本概念及原理	128
5.5.2 案例表示与案例库	129
5.5.3 案例推理与 GIS 结合	132
5.5.4 基于案例的推理方法与相关技术	133
5.5.5 基于案例的推理方法存在的问题	135
参考文献	135
第 6 章 基于复杂系统理论的地理建模与分析	139
6.1 元胞自动机模型	139
6.1.1 元胞自动机的发展历史	139
6.1.2 元胞自动机进行地理模拟的原理及方法	142
6.1.3 元胞自动机在地理过程模拟中的应用	149
6.1.4 常用的 CA 模拟软件	162
6.2 未来土地利用模拟模型	162
6.2.1 未来土地利用模拟模型的原理与概念	162
6.2.2 FLUS 模型土地模拟的参数设置和建立过程	163
6.2.3 FLUS 模型的应用	167
参考文献	177
第 7 章 空间数据的知识挖掘	180
7.1 数据挖掘的发展历史	180
7.1.1 数据挖掘产生的背景	180
7.1.2 数据挖掘的基本概念	181
7.1.3 数据挖掘的研究现状与历史	182

7.2 数据挖掘的主要技术	183
7.2.1 数据挖掘发现的知识类型	183
7.2.2 数据挖掘常用的技术	184
7.3 利用数据挖掘技术发现地学知识	194
7.3.1 空间数据挖掘的概念	194
7.3.2 空间数据挖掘的研究进展	195
7.3.3 空间数据挖掘的任务	195
7.3.4 空间数据挖掘发现的知识类型	196
7.3.5 空间数据挖掘的方法	197
7.3.6 空间数据挖掘的步骤	198
参考文献	199
第 8 章 GeoAI 综合练习	201
8.1 实验一 基于 AutoML 的地表温度预测	201
8.1.1 实验目的与实验准备	201
8.1.2 使用 AutoML 进行训练	202
8.1.3 使用 AutoML 进行预测	203
8.1.4 AutoML 多算法分析结果比较	204
8.2 实验二 基于元胞自动机城市未来发展模拟	206
8.2.1 实验目的与实验准备	206
8.2.2 元胞自动机城市发展模拟	207
8.3 实验三 基于深度学习模型检测烟田影像中的烟草目标	209
8.3.1 实验目的与实验准备	209
8.3.2 预训练模型选择	210
8.3.3 处理深度学习的训练样本	210
8.3.4 执行深度学习	213
8.4 实验四 基于 GeoSOS-AI 的城市发展模型对比分析	214
8.4.1 实验目的与实验准备	214
8.4.2 城市发展模拟对比	214
参考文献	220

第1章 GIS 简介

1.1 GIS 的概念

GIS 是 geographic information system 的英文缩写, 中文翻译为地理信息系统。GIS 是一门处理地理空间数据的信息系统。关于 GIS 的概念, 不同的学科专业、不同的应用领域对其概念的理解也不尽相同, 众多研究机构也由此纷纷给出侧重点不同的定义。例如, 美国环境系统研究所(Environmental System Research Institute, ESRI)对 GIS 的定义为“GIS 是基于计算机的, 用于对地球上发生的事件或存在的现象进行分析和制图的工具”。美国国家航空航天局(NASA)也有类似的定义, 即“GIS 是计算机硬件、软件 and 操作人员集成的系统, 用来处理具有空间特征的地质地形、人口分布统计、图形图像等数据资源”。

另外, 美国联邦机构数字地图协调委员会(Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography, FICCDC)对 GIS 的定义是“GIS 是由计算机硬件、软件 and 不同方法组成的系统, 该系统设计用来支持空间数据采集、管理、处理、分析、建模和显示, 以便解决复杂的规划和管理问题”(胡鹏等, 2002)。美国国家地理信息与分析中心(National Center for Geographic Information & Analysis, NCGIA)则认为, GIS 是为了获取、存储、检索、分析和显示空间定位数据而建立的计算机化数据库管理系统。

同时, 许多学者根据他们的专业背景, 也给出了各自的定义。例如, Goodchild 将 GIS 理解为“一个能够采集、存储、管理、分析和显示有关地理现象的信息的综合系统”(Goodchild, 1992)。Dueker 的定义为“GIS 是一个由硬件、软件、操作人员、数据、规则等组成的, 来采集、管理、存储、分析和输出地球某区域的数据信息的应用系统”(Demers, 2001)。

我国的 GIS 学者也有类似的定义。陈述彭等(1999)认为, GIS 是一种采集、存储、管理、分析、显示与应用地理信息的计算机系统, 是分析和处理海量地理数据的通用技术。邬伦等(2001)将 GIS 定义为“描述、存储、分析和输出空间信息的理论和方法的一门新兴的交叉学科, 同时 GIS 是一个技术系统, 是以地理空间数据库为基础, 采用地理模型分析方法, 实时提供多种空间的和动态的地理信息, 为地理研究和地理决策服务的计算机技术系统”。汤国安等(2010)则认为“GIS 是一种特定而又十分重要的空间信息系统, 它是在计算机硬件和软件系统支持下, 对整个或部分地球表面(包括大气层在内)与空间和地理分布有关的数据进行采集、储存、管理、运算、分析、显示和描述的技术系统”。

上述机构和学者在 GIS 组成、功能、应用等方面给出了多方面的定义, 但随着计算机软件和硬件的快速发展, GIS 基本原理的不断完善、理论方法的不断创新, 想要完整、全面、唯一地给出一个适当的 GIS 定义是不容易的。同时, GIS 的发展日新月异, 应用领域也与日俱增, 对不同的 GIS 使用者来说, GIS 的定义也是各不相同的。本书通过以下几个方面来探讨 GIS 包含的基本内容和所涉及的一些基本概念, 并从空间分析的角度给出 GIS 的定义。

1.1.1 G

G(geographic 或 geo)表示地理或地理空间。GIS 所研究的对象是数据, 是与地球或地理位

置有关的数据,是具有空间特征的数据。数据是某一现象、目标、过程、结果的定性或定量的描述资料,可以是图形、图像、表格、声音、文字、符号、数字等形式。数据的特征包括空间位置特征和时间属性特征。空间位置特征描述了数据所在的地理位置,这种位置可以是绝对的(用大地坐标系统、经纬度来表示),也可以是相对的(假设的坐标系统或参照系统,表示数据间的相对位置);时间属性数据是指 GIS 研究的地理对象、事件和现象发生的时刻,或指数据获取的时间。地理环境中的研究对象并不是稳定不变的,它随时间的变化而发生变化,同一对象对应不同的时间可以获取一组不同的数据,时间特征是地理数据的一个基本特征,也是空间分析中所用数据必备的特征之一(王学军, 1997; 张犁等, 1998)。

1.1.2 I

I(information)表示信息。在 GIS 中,信息是相对数据而言的,信息源于数据,但比数据更加高级。信息是从数据中得到的,是人们更好地认识和理解现实世界的知识和规则,是管理、分析、决策、生产、建设、改造现实世界的依据。信息具有客观性、实用性、可传输性和共享性等特征。数据是未经加工过的原始资料,是对客观对象的描述,是信息获取的基础;信息是数据内涵的意义,是数据的内容和解释。例如,从统计数据中可以获取数据的变化和规律信息,从数字高程数据中可以得到地物的高程变化信息,从专题地图数据中可以得到各类多专题信息等(王学军, 1997; 张犁等, 1998)。

1.1.3 S

S(systems, science, serve 等)表示系统。这也是 GIS 最早概念中所包含的意思。GIS 作为系统,包含性质、特征、功能和应用等。系统是具有某些特定功能、为某些特定目标服务、包含某些特定要素和相互之间密切联系的一个有机整体。

随着 GIS 理论的完善、技术的发展, S 有了更多层面的含义。将 GIS 作为一个系统,只表明了 GIS 是关于地理空间数据的一个计算机应用,或是作为一个处理空间问题的技术,或是采集、存储、显示、分析、管理空间数据的一种数据库,所有的这些都是 GIS 应用的初级阶段。GIS 更加成熟后,必然会作为一个完善的学科来面向地学研究者和 GIS 的用户。20 世纪 90 年代,美国著名的 GIS 专家 Goodchild 最先提出了 GISci,即地理信息科学,将 GIS 从一种技术、方法、应用升级到一门学科,将 GIS 作为一门学科来看待(Goodchild, 1992)。

近些年计算机硬件的快速发展也为 GIS 软件的普及应用提供了坚实的基础,使得 GIS 的应用领域和应用学科更加广泛,成为人们日常生活中不可缺少的一部分。在将 GIS 当作一门学科的基础上,更有人提出了 GIServe(地理信息服务)和 GISudies(地理信息研究)的概念,这些都代表了 GIS 不同的应用层面。

1.1.4 GI

GI 表示地理信息或地学信息。GI 是关于现实世界地理空间实体对象的性质、特征、功能、状态的描述的数据和信息,是对表达地理现象与地理特征之间关系的地理空间数据的解释。地学信息比地理信息的范畴更广,它不仅表示了地球表面地理空间的信息,还包括了地球岩石圈、水圈、大气圈等信息,地学信息也逐渐取代了地理信息,成为 GIS 的主要研究对象。

地理信息和地学信息除了具备信息的一般特征外,还具备空间特征、海量特征等。空间特征是指地理信息和地学信息都具备了空间定位的特点,地理信息和地学信息不是孤立存在

的,信息间具有一定的空间距离、空间关系等属性特征。海量特征是指地理信息和地学信息的数据量都很大,描述的信息包含了空间特性和时间特性。当前的信息都以数字的形式存储在计算机中,存储空间都是几十倍、上百倍地增长,这些都需要计算机硬件的支持。

1.1.5 IS

IS 表示信息系统、信息科学、信息服务等。信息系统是具有采集、存储、管理、分析和表达数据能力的系统,可以为不同的用户提供问题解答,为决策过程提供辅助信息。一个基于计算机的信息系统包含了硬件、软件、数据和用户四个主要组成部分(邬伦等, 2001)。信息科学是研究信息的产生、获取、存储、传输、处理和使用的一门学科,它将信息作为主要研究对象,以信息的运动过程的规律作为主要研究内容,以信息科学方法论作为主要研究方法,以扩展信息的功能、信息的应用范围作为主要的研究目标。信息服务是指有效地运用信息加工设备(算法)对信息资源进行科学加工,并将加工结果提供给信息加工设备的维护者及信息处理方法的使用者。

1.1.6 GIS

根据上面的相关概念,本书认为 GIS 包含了如下特征:以计算机软件、硬件为基础,具有对空间信息的采集、管理、存储、分析、显示、输出等功能;具有丰富的空间分析及模型能力,能基于地理空间数据库,对复杂的现实地理世界进行描述、抽象分析、模拟、预测和优化,不仅对许多地学现象的格局,还包括对其过程进行深刻的认识;能深入不同领域、机构和行业,为各种用户提供空间信息服务。

1.2 GIS 的组成、基本功能和应用

1.2.1 GIS 的组成

完整的 GIS,其基本组成一般包括以下 5 个主要部分:计算机硬件系统、计算机软件系统、地理空间数据(数据库)、GIS 应用模型、GIS 用户。

1. 计算机硬件系统

计算机硬件系统是 GIS 功能实现的物质基础,包括各种硬件设备,根据 GIS 的使用对象范围的不同又分为通用设备、单机设备、局域网设备和广域网设备。

通用设备是指数字化仪、扫描仪、绘图仪、测绘仪器、遥感设备、多媒体设备等可以通用、共享的硬件;单机设备指网络中每个终端的计算机所包含的硬件设备,有硬盘(磁带机)、显示器、显卡、鼠标、键盘等;多组单机设备通过局域网的网络设备(网卡、网线、交换机等)连接在一起,组成局域网设备;多组局域网设备通过服务器连入 Internet,组成广域网设备。

2. 计算机软件系统

计算机软件系统包括使用 GIS 所必需的各种软件和应用程序,一般分为三个部分:系统软件、基础软件和 GIS 软件。计算机软件系统金字塔形的层次结构见图 1.1。

系统软件是指操作系统,是其他软件运行的基础;基础软件包括数据库软件、编程语言软件、算法库软件等。数据库软件是计算机软件系统的重要组成部分,用来存储和管理空间数据和属性数据等;GIS 软件是计算机软件系统的核心,用于执行和支持 GIS 各项功能的操作和实现,包括数据输入、编辑、存储、分析、数据库管理、空间分析操作和图形图像显示

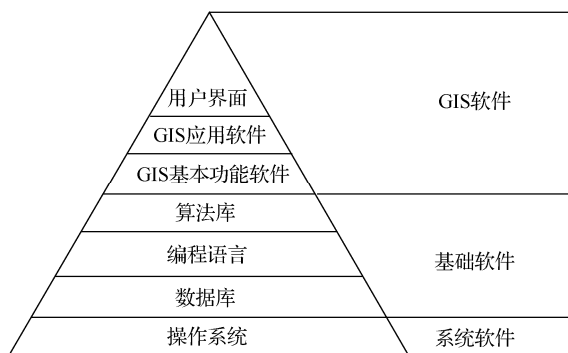


图 1.1 计算机软件系统层次结构

以及结果输出等 GIS 基本功能软件、GIS 应用软件、用户界面。GIS 软件一般指具有丰富 GIS 功能的专业型软件，它可以处理实现各种 GIS 高级功能，并可以在其基础上进行某些应用的二次开发，应用较广的国内外 GIS 专业软件有 ArcGIS、MapInfo、MapGIS、GeoStar 和 SuperMap 等。

3. 地理空间数据

空间数据是地理信息的载体，是 GIS 的操作对象，是现实地理世界在计算机中的抽象和模拟，由 GIS 使用者在 GIS 软件的支持下，利用数据获取硬件设备输入计算机中。GIS 空间数据有矢量和栅格两种主要数据结构，在矢量数据结构中，空间对象通过点、线、面等实体表示；在栅格数据结构中，空间对象用栅格单元表示。

GIS 特殊的空间数据结构和数据编码方法，决定了 GIS 空间数据以结构化的形式存储在计算机中，存储空间数据的数据库称为空间数据库。空间数据库可以存储海量的空间数据，并支持对空间数据的查询、检索、增删、修改和维护。GIS 中除了使用空间数据外，还需要利用一定的属性数据，空间数据库还必须解决空间数据与属性数据建立关联的问题(Haining, 2003)。

4. GIS 应用模型

模型是为了解决某一问题而将其抽象化表示的数学公式，GIS 应用模型是为了解决地理空间的各实际问题而建立起来的模型，是 GIS 产生社会经济效率的关键之处。同时，GIS 应用模型的建立也是评价 GIS 应用成功与否的重要因素。针对各种实际问题，目前众多研究中提出了很多基于 GIS 技术的应用模型，这些模型成为解决实际应用问题的切实有效的基本工具之一。常见的模型包括：水土流失模型、最优化模型、选址模型、土地利用适宜性模型、人口增长模型和森林监测模型等。这些模型将现实世界中的实际问题抽象为数学公式，并进一步表示在计算机中，利用 GIS 技术得到模型的解，应用于解决实际问题，从而带来社会效益。GIS 应用模型是连接 GIS 与相关应用领域的纽带，二者的有机联系并不能仅仅依靠数学上或技术上的知识，还得依靠广泛的专业知识和应用领域内的专家知识，才能对实际问题的产生机理和变化过程进行深入透彻的研究，并找出各种内在的因果关系和规律，利用定性描述和定量分析的方法，才能更好地建立一个 GIS 应用模型(Li, 2005)。

5. GIS 用户

用户又分为系统开发、管理、维护人员和 GIS 应用用户两类。用户是 GIS 的重要组成部分，GIS 就是为用户的问题和疑惑进行解答和解释，对用户的某些想法进行实现的一门学科和技术。不同知识水平和专业背景的用户，使用 GIS 得到的结论和应用结果也不相同。为了

更好地利用 GIS, 需要专业化的人才来进行系统开发、管理和维护。为了面向更多的大众用户, GIS 系统开发时应注重易用操作性。在开发过程中, 开发者必须根据实际问题的要求和具体情况来解决系统开发的策略、软硬件的选择和空间数据库的构建类型等问题, 而且要使得开发的系统具有管理简单、维护方便、可移植性好等优点。GIS 应用用户是 GIS 存在的基础, 没有这些应用用户不断地提出需求和问题, 就不会有 GIS 的存在和发展。

1.2.2 GIS 的基本功能

GIS 的基本功能包含在 GIS 应用的各个方面, 它主要解决以下 5 类问题(邬伦等, 2001): ①位置, 即空间特征, GIS 可以给出特定的地理空间实体、现象或事件的准确空间位置。②条件, 即约束特征, 任何实体对象的存在都不是孤立的, 是在满足一定约束条件的前提下与其他实体共同存在于地理空间中, GIS 可以在多个约束条件的限制下给出研究问题一个准确的、合理的和满意的答案。③趋势, 即发展、变化的方向, 地理空间是随着时间连续变化的, 地理事件和对象的发展也随着时间的变化而发生变化, GIS 可以结合时间特征和空间特征, 来准确地确定实体对象的变化趋势, 并能预测事件的发展方向。④模式, 即规律特征, 往往与地理学规律有关。事件的发生总是具有一定的规律性, 在地理空间中总会找到相同或相似的案例, GIS 可以从已发生的案例事件中找出事件发展的模式(一般规律), 并将其提供给未发生的事件, 来指导和约束其变化。⑤模型, 即概括特征, 是根据实际发生的地理事件或具体的对象, 用数学公式来抽象表示。GIS 可以根据模型来模拟现实世界的地理空间, 解决各种实际问题, 这是 GIS 的一个重要功能之一(龚健雅, 1999; 龚健雅等, 2024)。

此外, GIS 作为一个采集和管理空间数据, 并针对一些空间问题可以给出合理解释的信息系统, 还具备以下功能。

1. 数据采集

GIS 分析和操作的对象是空间数据, 所以空间数据采集是 GIS 基本功能之一。在 GIS 领域一个公认的原则是, 建立 GIS 应用系统的总投资中约 70% 的费用用于数据采集和数据库建立。数据采集途径很多, 可以通过现有地图数字化获取, 可以采用数码仪器获取数字信息, 还可以通过野外实测、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)和遥感等方法获取空间数据。收集的空间数据需要录入地理空间数据库中, 这也是一项费时、费力的工作。随着 GIS 应用领域不断拓宽, 空间数据的采集量也不断增加, 如何有效地共享和整合不同研究领域的空间数据, 加快数据采集的速度和效率, 已成为制约 GIS 发展的一个重要的问题。

2. 数据管理

录入地理空间数据库中的数据并不是通用的, 要根据实际研究问题对数据进行格式转换和统一。GIS 数据包括矢量数据和栅格数据两种类型。某个 GIS 软件(系统)存储的空间数据应用于其他 GIS 软件时, 也需要转换为不同的文件类型。随着应用系统的不断使用, 数据需要更新, 新添加的数据与原数据需在格式、类型、比例尺等方面一致; 且长时间使用空间数据库后, 容易产生错误数据和冗余数据, 要定期对数据库进行维护, 以减少数据间的错误和冗余, 提高系统的运行效率和运行速度。空间数据库具有层次模型、网络模型、关系模型和面向对象模型 4 种数据组织模型。在空间数据库的管理中, 如何将属性数据与空间数据有机地结合起来是一个重要的研究方向, 众多空间数据库都是将两类数据分别存储, 然后通过一个关联项(标识码)使它们连接在一起。

3. 空间分析

空间分析是 GIS 的基本功能, 主要包括空间查询、空间统计、一般的空间分析和空间模型推理分析等几类方法。空间查询包括数据的空间特征查询、属性特征查询、空间关系查询、时间特征查询以及拓扑特征查询等。空间统计分析是指将传统的统计分析方法引入地理空间数据中, 通过计算空间数据的统计指标来实现各项空间统计分析功能, 主要包括空间自相关分析、回归分析、趋势面分析等。一般的空间分析包括叠置分析、缓冲区分析、网络分析等, 这些是 GIS 中最常用的空间分析方法。空间模型推理分析是利用对地理空间的事件或问题所建立的模型, 推理分析与其类似的空间问题, 吸取其他学科领域的知识和方法构建能解决地理问题的分析模型, 常用的模型包括最优化模型、选址模型、网络模型、决策模型和案例推理模型等(王学军, 1997)。

4. 显示

GIS 求解中间过程和最终结论, 通过图形、图像、文字、数字、表格、多媒体等方式, 以人机交互的方式显示在用户界面上, 这是 GIS 分析结果的主要表达形式, 其输出效果是评价一个 GIS 系统性能的重要指标(Haining, 2003)。

1.2.3 GIS 的应用

随着 GIS 理论的完善和技术的发展, GIS 应用领域也越来越广, 从最早只作为一个数据采集和制图工具, 发展到现在使用地学信息分析方法来研究地理空间发生的事件和现象, 并做出合理解释的一个学科。GIS 的主要应用领域有以下几个。

1. 地图制图

GIS 技术最早源于计算机机助制图, 也就是当作一种地图制图技术面向众多应用者。地图制图是测绘领域内基本研究工作之一, GIS、GNSS 和遥感(remote sensing, RS)被认为是测绘领域的“3S”, 被广泛应用于测图制图中。GNSS 技术用于空间定位, 获取地理对象的空间信息; RS 技术用来获取多尺度、多时相、多平台的数字图像, 为区域多比例尺快速成图奠定基础; GIS 技术可以收集、存储、管理空间数据, 并通过用户界面或输出设备将地图以电子格式或纸质地图形式提交给用户。“3S”技术促使测绘领域和地图制图学发生革命性变化, 使得地图数据获取与成图技术发生根本性变化, 主要表现在地图产品格式升级、地图成图精度大幅提高、成图周期明显缩短、制图成本逐渐下降、自动化程度越来越高(郭达志等, 2000)。

2. 城市与区域规划

GIS 在城市与区域规划中的应用更多表示出来的是其空间信息管理、显示, 以及分析与模型等功能。城市与区域规划中涉及资源、环境、交通、经济、人口、金融、教育和管理等多方面地理对象或地理空间数据, 并且城市与区域规划中不同性质和不同特点的问题又使用到不同类型空间数据和属性数据, GIS 在城市与区域规划中最基本应用就是收集和管理这些数据, 将数据归并到统一空间数据库中, 为城市与区域的开发和规划服务(孙秀英, 2010)。

城市与区域规划中最主要的研究问题有城市与区域整体规划、道路交通运输规划、土地适宜性评价、公共资源的分配与公共设施的配置、城市土地和环境资源的动态监测等, 这些问题的解决需要 GIS 技术和方法的支持。城市与区域规划领域的 GIS 用户根据实际问题建立了一些空间模型和算法, 来解决规划领域的复杂问题, 常见的模型和算法有最优化模型、区位-配置模型、选址模型、投入产出模型、0-1 规划模型、多准则决策模型、空间相互作用模型、优

化搜索算法、案例推理方法等。GIS 软件可以帮助规划部门解决城市与区域规划中遇到的问题,是实现科学规划的重要保证。

3. 国土监测与灾害监测

多时相遥感数据可以获得一个区域多个时间的遥感数字图像,通过数字图像分析处理技术可以得到该区域的土地利用图、资源分布图等专题图。GIS 技术与多时相遥感图像相结合,可以进行土地利用动态变化分析、资源现状调查与动态监测、森林灾害的预警预报、洪水灾害的预测和淹没损失估算。

GIS 技术可以为土地和资源监测提供技术支持,同时 GIS 的一些模型与算法应用在灾害监测中有助于制定救援决策、提供救援方法和路线等,以保证用最快的反应速度来应对各种突发的自然灾害和人为灾害。国内外有众多关于 GIS 在国土监测与灾害监测中应用的成功案例, GIS 已经成为这两个领域内重要的辅助技术(郭达志等, 2000)。

4. 资源调查与管理

中国地大物博,资源丰富,快速、准确地了解和掌握各种资源的总量以及变化情况,对决策部门制定准确的规划与开发计划有着很重要的作用。各类资源分布情况不同,调查方式不同,调查尺度各异,甚至有些资源分布于人类无法直接到达的区域,这就为资源详查带来一定难度。GIS 技术与遥感技术相结合,可调查并分析各类自然资源的分布与动态变化。由此获取的资源调查数据和信息能够被有机整合,并在 GIS 软件的支持下,实现对大型地理数据库与自然资源管理信息系统的一体化无缝管理。用户通过 GIS 客户端软件可以直接对数据库进行查询、显示、统计、制图以及进行区域多种组合条件的资源分析,这为资源合理开发利用、规划决策和科学有效管理各种自然资源提供了决策依据(Kelsey et al., 2004; 程文, 2005)。

将 GIS 模型应用于资源调查与管理中,可以得到更加喜人的成果。例如,森林蓄积量模型可以在不砍伐树木的情况下调查一定区域范围内森林的有效利用和保护情况;农作物估产模型可以提前估计农作物的收成;土壤侵蚀模型可以探讨土壤污染的机理,并提出合理的改良方案;等等。资源调查、管理是 GIS 应用最为广泛的领域之一,也是趋于成熟完善的领域之一。目前,研究重点应放在模型预测的精度评定上,如何有效地提高模型预测的精度,是 GIS 在资源调查和管理领域应用的重要约束条件(程文, 2005)。

5. 环境管理与保护

环境问题已经成为制约经济快速发展的主要因素,环境问题也关系着人类生存和发展。利用 GIS 技术建立环境监测、分析和预报系统,为实现环境快速监测和科学化、自动化管理提供了基本条件。通过对环境的快速监测,可以及早发现环境污染区域,结合 GIS 的分析决策模型,可以快速做出应对方案和处理办法,将环境污染危害降到最低。

6. 军事国防

很多科学技术最早是为了解决军事问题才被提出的,如 GNSS。但 GIS 最早并不是应用于军事上,随着军事国防中科技应用的逐渐增加,加上 GIS 与 GNSS、RS 的有机结合, GIS 在军事上也得到了广泛的应用,并产生了很多成功应用的案例。例如,军事战争中的精确打击需要空间位置、地形等数据,并结合 GNSS 才能实现。由此,“3S”技术被广泛应用到战略构思和战术安排等关键环节,“3S”技术已经成为影响战争成败的关键因素之一。各个国家都在军事国防上大范围使用了 GIS 技术,使 GIS 成为高科技战争的一个重要技术工具(刘震和李树楷, 1997)。

7. 辅助决策

GIS 利用其空间数据库, 结合一系列优化决策模型, 为管理部门制定宏观决策提供技术支持。同时, GIS 与网络技术结合, 使得远程决策制定变为现实, 为政府机构、跨国和跨地区的大公司、远程客户与市场等提供了一种交互式问题解答与决策交流的平台, 所以说 GIS 技术是一种高效的决策辅助工具。

1.3 GIS 发展方向

世界上公认的第一个实用 GIS 系统是加拿大地理信息系统(CGIS)。加拿大地理信息系统是由 Tomlinson 为加拿大农业部设计的, 1964 年正式投入使用。计算机技术的快速发展(CPU 运算速度得到极大提高、内外存迅速扩大、软件技术不断发展)使现代 GIS 的功能更为强大, 以前很难处理的海量空间数据的储存、运算和分析现在能方便地进行处理(Openshaw, 1984)。自 20 世纪 60 年代 GIS 在加拿大和美国产生, 到现在 60 多年时间里得到了飞速发展, 一是由于 GIS 所依靠的计算机硬件设备性能不断增强, 图形显示能力不断完善, 存储空间成倍增长, 满足了 GIS 发展的硬件条件; 二是计算机原理和技术不断完善, 尤其是数据库技术、编程语言、图像处理和人工智能技术的发展, 为 GIS 发展提供了软件与技术条件; 三是日益拓宽的应用领域不断地提出新需求和建议。这三个方面综合作用, 产生了当前的 GIS, 但 GIS 技术并不会停步于此, 它将随着新技术、新方法的产生, 新原理的发现以及多学科、多领域的交叉融合不断发展。当前的 GIS 有以下几方面的发展方向和趋势(龚健雅, 2004; 廖祥春, 1993)。

1.3.1 网络化

随着网络普及, GIS 从单机化发展到网络化, 基于 Internet 的 GIS 在全球范围内得到了极其快速的增长。Internet 是全世界上最大的公众网, 它面向多种对象, 根据对象提出的需求进行服务。GIS 易操作、易应用、价格低, 且支持多媒体形式结果输出的特点, 使它一旦与 Internet 结合, 就显示出独特的优越性来: 网络终端的各级用户可以通过 Internet 提出要求, 浏览异地空间数据、制作专题图等, 高级用户还可以远程使用 GIS 的高级空间分析等功能。

全球网络化是一个必然的发展趋势, 且在 GIS 技术发展过程中, 网络技术已经成为对 GIS 技术影响最大的一门创新技术, 结合 GIS 的自身发展, 使得 WebGIS 有了更加广阔的前景。GIS 网络化主要有以下几个方面的应用: ①数据共享, 远程用户可以相互之间共享异地空间数据; ②GIS 服务, 不同终端的用户可以根据自己遇到的实际问题, 实时地向远程其他终端或 GIS 服务器提出问题, 能够快速得到回复, 随着 GIS 网络软件的开发和研制, 网络 GIS 服务将成为 GIS 应用服务的主要方向; ③网络版 GIS 专题应用程序的发布, 当前许多基于 GIS 某些应用进行的二次开发, 也随着网络的发展和应用领域的拓宽而发展到网络化, 如城市交通管理信息系统、区域资源管理信息系统、人口管理信息系统等(张健挺和刘卫国, 1998; 张犁等, 1998; 朱国宾等, 1997)。

GIS 与计算机网络发展有着密切的关系。随着计算机技术的进步, GIS 在处理高分辨率传感器、合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)所产生的数据时, 面临数据信息聚集、时空聚集、分布式系统等层面的挑战。在此背景下, 云计算技术应运而生, 为 GIS 提供了强大的计算和存储能力。云 GIS 是基于云计算的地理信息系统, 是一种充分利用云计算平台中的各种软硬件资源, 将 GIS 服务架构在云计算平台

提供的基础设施之上,通过网络服务来满足用户对 GIS 的功能需求的地理信息系统应用。云 GIS 的核心概念是扩展地理信息系统的基本功能,以实现海量空间数据的高性能存取与处理操作,提供高效的计算能力和数据处理能力,从而解决地理信息科学领域中的问题。其本质是在支撑“云”基础设施的云计算中高效便捷地部署 GIS 平台及地理空间信息,以结合实际需求有针对性地灵活提供基于网络的服务。云 GIS 具有解决数据密集问题、分布式存储和计算、弹性伸缩和系统稳定性、容器化部署和自动化编排及高效便捷地部署等优势(林德根和梁勤欧,2012)。

1.3.2 组件化

组件化技术是当今软件技术发展的主要方向之一,它改变了传统软件开发模式的封闭、复杂、维护困难等特点。组件化 GIS 将组件技术与面向对象编程技术有机结合起来,应用于 GIS 软件设计和二次开发中。组件式 GIS 将 GIS 的各种功能模块集成为控件,在 GIS 系统开发时,利用面向对象的编程语言,根据应用的需要将控件集成起来,组成 GIS 系统基础平台和应用平台(李永红等,2005)。

软件开发技术的发展为 GIS 系统研制和开发提供了一种新方法,其将 GIS 数据结构、各种空间分析功能、各种专业模型等 GIS 系统的基本组成结构做成基本控件,为二次开发提供了方便。组件式 GIS 推动了 GIS 软件系统高度集成化和应用普及化,当前许多 GIS 专业软件都是以组件式开发的,已经成为 GIS 软件开发的主要潮流。

1.3.3 标准化

GIS 技术在多个研究领域得到了广泛的应用,也从最早的应用于一个实验室、一个城市、一个国家发展到现在全球范围内的多国家、多领域、多学科、多方向的应用范围。广泛地使用 GIS 技术,必定会带来使用标准的差异。不同系统之间的兼容性和通用性不强,会给 GIS 研制与开发带来一定的混淆,导致相当大的自然资源和人力资源浪费。今后 GIS 发展应首先统一标准,即制定严格统一的数据格式、开发标准、硬件需求、数据库类型以及通用模型等,使得 GIS 有一个统一的组成部分、数据类型、操作过程和软硬件基础,使 GIS 在一个统一的基础上不断发展和完善。

1.3.4 多维化

人们最早研究地理空间是从二维平面开始的,随着人们对客观世界认识的不断加深,更加注重空间的特性,从二维扩展到三维甚至多维。GIS 最早也是从研究二维平面开始的,其后慢慢引入数字高程模型(digital elevation model, DEM)来处理空间对象的高程信息,形成三维 GIS。三维 GIS 可以模拟地质、地理、气象、水文等研究领域的三维操作,结合虚拟现实技术来研究三维可视化。随着人们更加关注地理对象的时间特性,在三维 GIS 的基础上添加了空间对象的时间特征,构成四维 GIS。三维 GIS 假设地理对象或事件是一个稳定状态,而四维 GIS 则认为地理对象随着时间而动态地发生变化。四维 GIS 也称为空间-时间模型,对研究长周期复杂地理事件尤其重要。四维 GIS 面临着比三维 GIS 更多问题,数据量增长是其中最主要的一个问题,但随着数据采集技术和计算机技术发展,这个问题也将会得到解决。多维 GIS 已经成为当前研究热点,增加一维并不只是数据量的增长,而是可以提供相对于原来的几倍或者几十倍的信息和知识,使人们能够更加了解和掌握不停变化的地理空间(闵连权,2002; 朱庆,2004)。

1.3.5 商业化

GIS 商业化包括数据商业化、软件商业化和服务商业化。随着人们对地理空间认识的加

深,获取的空间数据量也不停地翻倍增长,当前仅依靠一个机构、组织或国家来获取所有需要的空间数据也是不可能的。同时,空间数据采集部分占 GIS 应用系统建立和开发所需成本的绝大部分,所以,数据交流和共享是降低 GIS 开发成本的重要途径,数据商业化是数据交流和共享的最佳方法。软件是 GIS 应用的基础,GIS 应用软件都是基于 GIS 基础软件进行二次开发的,软件商业化可以提高 GIS 应用软件开发效果、降低开发成本。服务商业化是指根据 GIS 提供的某些服务而收取一定的服务费用。GIS 商业化可以收回 GIS 系统开发的成本和数据收集的成本,有利于 GIS 不断发展。

1.3.6 大众化与信息服务

今天的 GIS 已经不像它刚刚面世的时候那么神秘了,随着 GIS 应用领域的不断拓宽,它越来越多地出现在人们的日常生活中。正因为 GIS 与大众的关联较深,所以它才会得到人们广泛的关注,才会飞速地进步。GIS 技术已经在默默地影响着普通人的日常生活,已经成为人们不可缺少的帮手之一,包括提供各种与空间信息有关的服务。地图是 GIS 的表现形式,GIS 地图核心是空间数据的处理与可视化,所以大众从 GIS 地图上可以获取某种地理现象的直观印象。同时,也产生了众包 GIS 概念。在众包模式下,地理信息数据采集充分借助移动互联技术,一些志愿者利用移动终端设备采集相应的数据并上传到后台数据库中,供相应的数据审核人进行审核,审核通过后再进行发布。

1.3.7 开源 GIS

开源 GIS 是一类以开源许可协议发布的地理信息系统软件,它们允许用户查看、编辑、分析和处理地理空间数据。开源协议在开源 GIS 的发展中起到了至关重要的作用,其消除了知识封锁,使得 GIS 技术不再受到专有软件的限制。不同于商业 GIS 软件,一些开源 GIS 软件不用考虑数据兼容、易用性等问题,开发者能够集中精力于功能开发。开源 GIS 软件技术的先进,离不开由开发爱好者组成的互联网社区的支持,其具有免费、提供源代码可修改、数据格式开放和强大的社区支持等优点。当然,开源 GIS 也存在一些不足,如产品体系不够健全、新技术集成能力较弱、操作界面较不友好、缺少定制化和系统较不稳定等。常见的开源 GIS 软件有 QGIS、gVSIg、GRASS GIS、Whitebox GAT 和 SAGA GIS 等。目前最主流的开源 GIS 软件路线为 QGIS+GeoServer 的解决方案(胡庆武等,2009)。

1.3.8 GIS 与人工智能

GIS 与人工智能(artificial intelligence, AI)之间存在许多有趣的交叉点,它们可以相互补充,二者相结合被称为 GeoAI。例如,黎夏等(2007, 2020)结合 GIS 和 AI,提出了地理模拟系统的理论和方法,用于解决复杂的地理系统模拟与空间优化决策问题。GIS 与 AI 的结合为地理信息系统带来了更高效、智能的应用方式,拓展了地理数据分析和应用的领域,有助于更好地解决各种空间问题。GIS 与 AI 相结合可以在数据分析和预测、影像识别与分类、路径规划和导航、智慧城市建设等方面发挥重要的作用。例如,在数据分析和预测中,人工智能算法可以通过处理大规模的地理信息数据,识别出隐藏在其中的模式和趋势,如在新型冠状病毒感染大流行期间,一些学者结合空间大数据对疫情发展的趋势进行预测,为政府制定疫情防控政策提供了参考。在路径规划和导航中,GeoAI 能更好地处理实时海量数据,开发出更智能、实时的导航系统,可考虑交通状况、道路状况、用户偏好等因素,提供最佳的路径规划(高松, 2020; 刘瑜等, 2022)。