


虚拟
流域

虚拟流域环境理论技术 研究与应用

XUNI LIUYU HUANJING LILUN JISHU
YANJIU YU YINGYONG

冶运涛 蒋云钟 梁犁丽 曹 引 等 编著

 海洋出版社

虚拟流域环境理论技术 研究与应用

冶运涛 蒋云钟 等 编著
梁犁丽 曹 引

海洋出版社

2019年·北京

内 容 简 介

本书将虚拟地理环境和流域科学相结合,探索了虚拟流域环境的理论框架,研究了虚拟流域环境仿真模拟技术、虚拟流域环境三维建模技术和虚拟流域环境水体仿真技术,并开展了虚拟流域环境理论技术的示范应用,开发了汶川地震灾区堰塞湖溃决洪水仿真模拟平台、洞庭湖流域防洪调度三维虚拟仿真平台、哈尔滨城区溃堤洪水淹没三维情景仿真平台、玛纳斯河流域干旱模拟评估三维虚拟仿真平台、南水北调中线工程水量水质调控三维虚拟仿真平台、长江上游梯级水库群水动力水质仿真模拟平台、黑河流域水资源调配三维虚拟仿真平台、福建省水资源实时监控三维虚拟仿真平台、金沙江下游梯级电站水沙虚拟仿真分析平台、基于三维虚拟环境的水利工程可视化仿真平台、基于数字地球的流域实时感知可视化仿真平台等。

本书可供水信息、水资源、水灾害、水环境、水利工程、计算机图形学等专业技术人员及高等院校相关专业师生参考,同时可以供从事水利信息化行业的企业公司技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

虚拟流域环境理论技术研究与应用 / 冶运涛等编著. —北京:海洋出版社, 2019. 11

ISBN 978-7-5210-0449-6

I. ①虚… II. ①冶… III. ①流域环境-模拟系统-研究 IV. ①X321

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 239506 号

责任编辑:常青青

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

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

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷

2019 年 11 月第 1 版 2019 年 11 月北京第 1 次印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:19.75

字数:396 千字 定价:98.00 元

发行部:010-62132549 邮购部:010-68038093 总编室:010-62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

虚拟流域环境不仅是“数字流域”建设的重要研究内容，而且是“智慧流域”发展的基础，它是深度融合虚拟地理环境和流域科学而衍生的水利研究领域，是“流域物理空间”“流域信息空间”和“流域社会（决策或管理）空间”构成的“流域三元空间”耦合协同联动的纽带，更加强调了在三维虚拟环境中，复演流域历史、跟踪流域现状和推演流域未来。它是采用以虚拟现实技术为核心的虚拟地理环境理论技术，结合水利专业知识和专业模型等，将流域水资源管理中不同类型的数据用逼真的、能直观的感受的形式表现出来，以动态展示流域时空变化规律，提供多方协同参与虚拟空间，辅助流域水资源管理决策支持。相比传统的流域管理系统，建立虚拟流域环境平台，一方面可以通过对江河湖海、水利水务设施、流域地形地貌、城市建筑，以及相关自然景象进行逼真的三维模拟仿真，以增强流域信息表达的直观性，提高系统对多维海量流域数据的显示和处理能力，从而便于用户对信息的解读；另一方面可以集成多种水利专业模型和水利大数据分析模型，结合三维虚拟环境，实时、可交互地展现模型方案结果供决策者决策，从而为流域管理提供全面、有效、综合的技术服务。虚拟流域环境为流域综合管理与智能决策提供有效的技术支撑，对推动水治理体系和治理能力现代化具有重要作用，是现代科技在流域管理中的一个重要发展方向。

本书以虚拟地理环境和流域科学相结合为出发点，按“理论框架-关键技术-示范应用”的研究思路，探索了虚拟流域环境理论框架，研究了虚拟流域环境仿真模拟技术、虚拟流域环境三维建模技术和虚拟流域环境水体仿真技术，并开展了虚拟流域环境理论技术的示范应用，开发了汶川地震灾区堰塞湖溃决洪水仿真模拟平台、洞庭湖流域防洪调度三维虚拟仿真平台、哈尔滨城区溃堤洪水淹没三维情景仿真平台、玛纳斯河流域干旱模拟评估三维虚拟仿真平台、南水北调中线工程水量水

质调控三维虚拟仿真平台、长江上游梯级水库群水动力水质仿真模拟平台、黑河流域水资源调配三维虚拟仿真平台、福建省水资源实时监控三维虚拟仿真平台、金沙江下游梯级电站水沙虚拟仿真分析平台、基于三维虚拟环境的水利工程可视化仿真平台、基于数字地球的流域实时感知可视化仿真平台等。本书由冶运涛、蒋云钟、梁犁丽、曹引等撰写，长江科学研究院叶松高级工程师和李喆教授级高级工程师、水利部松辽水利委员会水文局（信息中心）孙艳兵高级工程师、水利部松辽水利委员会水文局（信息中心）黑龙江中游水文水资源中心刘国忠高级工程师、兰州交通大学顾晶晶研究生等参与撰写。

本书研究工作得到了国家重点研发计划课题“水功能区水质立体监测技术与应用”（编号：2017YFC0405804）、水利前期工作项目“智慧水利总体方案编制”（编号：资水利前期 01871901）、“十二五”国家科技支撑计划课题“基于物联网的流域信息获取技术研究”（编号：2013BAB05B01）、国家自然科学基金项目“冲积河流过程水沙输移模型不确定性分析及数据同化方法研究”（编号：51309254）、国家重点研发计划课题“水资源立体监测协同机理与国家水资源立体监测体系研究”（编号：2017YFC0405801）的资助。本书的研究工作还得到了清华大学王兴奎教授、华北电力大学张尚弘教授的具体指导和帮助，在此致谢！

虚拟流域环境研究是一个极其复杂的系统工程，涉及的理论内涵和实践领域非常广泛，目前还处在起步和探索阶段，本书仅是抛砖引玉。由于时间和作者水平有限，书中错误和纰漏在所难免，恳请各位读者对本书的不足之处给予批评指正。本书尽力将所有涉及的观点和内容加以标注引用，若有不慎遗漏之处，请予以包涵。

冶运涛

2018年8月于北京

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 虚拟地理环境概述	2
1.3 虚拟地理环境的研究进展	8
1.4 虚拟地理环境在数字流域中的研究进展	11
1.5 本书主要内容	15
第2章 虚拟流域环境理论框架	17
2.1 引言	17
2.2 虚拟地理环境体系架构	17
2.3 虚拟地理环境研究思路	19
2.4 虚拟地理环境功能框架	20
2.5 虚拟流域环境技术框架	26
第3章 虚拟流域环境仿真模拟技术	34
3.1 引言	34
3.2 虚拟流域环境三维图形生成原理	34
3.3 虚拟流域环境纹理映射	43
3.4 虚拟流域环境碰撞检测	47
3.5 虚拟流域环境交互漫游	53
3.6 虚拟流域环境海量数据组织	58
3.7 虚拟流域环境数据实时调度	61
3.8 虚拟流域环境系统开发框架	66
第4章 虚拟流域环境三维建模技术	79
4.1 引言	79
4.2 虚拟流域环境建模平台	80
4.3 虚拟流域环境地形建模技术	82
4.4 虚拟流域环境地物建模技术	95

4.5 基于倾斜摄影测量的建模技术	105
第5章 虚拟流域环境水体仿真技术	113
5.1 引言	113
5.2 水体仿真模拟技术分析	114
5.3 水体仿真模拟技术比较	121
5.4 水体仿真模拟发展趋势	122
第6章 汶川地震灾区堰塞湖溃决洪水仿真模拟平台	125
6.1 引言	125
6.2 堰塞湖溃决洪水仿真平台总体结构	125
6.3 堰塞湖溃决洪水仿真平台开发	126
6.4 堰塞湖空间分布及危害程度显示	128
6.5 溃决洪水仿真事件对象建模方法	128
6.6 堰塞湖蓄水时空过程动态仿真模拟	130
6.7 堰塞湖洪水数学模型与仿真平台集成	130
6.8 堰塞湖溃决洪水演进过程动态可视化	132
第7章 洞庭湖流域防洪调度三维虚拟仿真平台	135
7.1 引言	135
7.2 研究区域概况	136
7.3 防洪调度仿真软件开发工具	136
7.4 防洪调度仿真数据库生成	137
7.5 防洪调度三维可视化平台	139
7.6 防洪调度仿真平台功能	139
第8章 哈尔滨城区溃堤洪水淹没三维情景仿真平台	144
8.1 引言	144
8.2 溃堤洪水淹没预警系统设计	145
8.3 溃堤洪水淹没预警三维场景建模	147
8.4 溃堤洪水淹没预警数据库设计	153
8.5 溃堤洪水数学模型与集成模式	153
8.6 溃堤洪水淹没情景仿真系统开发	157
第9章 玛纳斯河流域干旱模拟评估三维虚拟仿真平台	162
9.1 引言	162
9.2 干旱演化仿真系统总体框架	163
9.3 干旱演化仿真数据库建立	165

9.4	干旱演化仿真系统平台开发	168
9.5	干旱演化仿真系统功能	170
第 10 章	南水北调中线工程水量水质调控三维虚拟仿真平台	175
10.1	引言	175
10.2	水量水质调控仿真总体框架	176
10.3	水量水质调控仿真平台开发流程	178
10.4	水量水质调控仿真平台综合数据库	178
10.5	水量水质调控仿真平台研发	180
10.6	水量水质调控仿真平台功能实现	182
第 11 章	长江上游梯级水库群水动力水质仿真模拟平台	187
11.1	引言	187
11.2	梯级水库群调控仿真平台系统分析	187
11.3	梯级水库群虚拟环境建模方法	189
11.4	梯级水库群调控仿真平台开发	191
11.5	梯级水库群调控仿真模拟关键技术	192
11.6	工程实例应用	199
第 12 章	黑河流域水资源调配三维虚拟仿真平台	201
12.1	引言	201
12.2	水资源调配仿真平台框架	202
12.3	水资源调配仿真平台关键技术	204
12.4	水资源调配仿真基本场景建设	209
12.5	水资源调配仿真高级环境建设	211
12.6	水资源调配仿真基本功能建设	214
第 13 章	福建省水资源实时监控三维虚拟仿真平台	215
13.1	引言	215
13.2	水资源实时监控仿真平台结构	216
13.3	水资源实时监控仿真关键技术	219
13.4	水资源实时监控仿真平台功能	223
第 14 章	金沙江下游梯级电站水沙虚拟仿真分析平台	227
14.1	引言	227
14.2	梯级电站水沙仿真平台总体设计	227
14.3	梯级电站水沙仿真虚拟环境建模	228
14.4	梯级电站水沙仿真分析关键技术	230

14.5 梯级电站水沙仿真分析主要功能	234
第 15 章 基于三维虚拟环境的水利工程可视化仿真平台	247
15.1 引言	247
15.2 基于 VRGIS 三维可视化仿真的基本原理	247
15.3 面向可视化仿真的空间数据库的建立	248
15.4 水利工程三维可视化数字模型构造方法	250
15.5 水利工程静态实体数字模型建立	252
15.6 水利工程动态实体数字模型建立	258
15.7 与三维数字模型的可视化仿真交互	263
15.8 工程实例应用	265
第 16 章 基于数字地球的流域实时感知可视化仿真平台	266
16.1 引言	266
16.2 系统总体框架与三维可视化平台	267
16.3 传感网资源实时服务技术	269
16.4 卫星在轨运行可视化仿真技术	271
16.5 空间数据服务及网络可视化技术	276
16.6 网络水利信息的实时获取技术	277
16.7 系统功能实现	280
第 17 章 结论	283
参考文献	287

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着城镇化和工业化的深入发展,全球气候变化影响加大,流域下垫面的状况发生了巨大变化,流域的规划与管理面临着严峻的形势(Grossner等,2008)。数字流域作为一种高技术的发展战略,以遥感(Remote Sensing,RS)、地理信息系统(Geographic Information System,GIS)、全球定位系统(Global Positioning System,GPS)、数据库、网络以及虚拟现实(Virtual Reality,VR)等技术为手段,对流域内的空间地理、自然资源、航运交通、社会经济等各个领域的信息进行处理、分析和研究,实现全流域的数字化管理与智能决策,是现代化的流域规划与管理的有力工具(李德仁等,2010)。中共中央、国务院发布关于加快水利改革发展的决定,明确要求强化水文气象和水利科技支撑,推进水利信息化建设,提高水资源调控、水利管理和工程运行的信息化水平,以水利信息化带动水利现代化。数字流域作为水利信息化的前沿研究领域,为流域的规划管理与社会经济宏观决策提供依据,对实现流域管理的数字化、智能化、网络化和一体化,推进水利行业的改革发展具有重要意义(李德仁等,1999)。

数字流域是一个复杂的系统工程,需要处理多维的海量流域数据(王光谦等,2006),涉及社会、经济、地理、水文、航运和生态等多个学科领域(张勇传等,2001;汪定国等,2002a,2002b;朱庆平,2003;熊忠幼等,2002;王光谦等,2005)。对海量数据的一体化管理和对多学科专业模型的集成应用是数字流域管理的核心问题。建立大统一的数字流域平台是一个提高流域数据处理能力和融合各学科技术成果的可行方案(阮本清等,2001)。数字流域平台通常可划分为数据采集系统、数据库系统和数据调用平台三个层次(王永伟等,2010)。它们既相互独立,又相辅相成,可以自下而上地协同完成数据的处理和分析。多源数据经过数据采集系统的采集,首先在数据库系统层进行集中整合、组织、存储,然后通过数据调用平台进行展现,最后应用专业模型完成处理、分析与显示,实现数字流域平台在各个专业背景下的管理决策。这样的数据处理方式,一方面可以简化数据处理流程,减少数据对接步骤,缩短软件开发周期,提高流域管理效率;另一方面可以综合各方面的信息资源,使流域管理者能够全方位地进行流域管理决策,保证流域的资源都能得到科学、合理地利用(张尚弘,易

雨君,王兴奎,2011)。

虚拟地理环境和流域科学相结合衍生出的虚拟流域环境是“数字流域”的一个重要研究内容,它是采用虚拟现实技术,结合计算机图形学、计算机动画和水动力学模拟等,将流域水资源管理中不同类型的数据用逼真的、能直观感受的形式表现出来,以动态展示流域时空变化规律,辅助流域水资源管理决策支持。随着虚拟现实技术的不断普及,其在水利等相关行业逐渐得到了广泛的应用。虚拟流域环境的建设在以下几个方面有着重要意义(张尚弘,易雨君,王兴奎,2011):

首先,增强水资源信息的直观表达,能满足科学计算结果可视化的需求。随着水资源管理中需要处理的信息量不断膨胀、仿真区域范围不断增大以及对流域虚拟仿真的精细化程度越来越高,对流域信息的高度集成、综合分析和动态展示提出了更高的要求。使用虚拟现实技术可对江河湖海、水利设施以及相关的自然景象进行照片级真实的仿真。通过和数学模型相结合,对科学数据进行直观的可视化显示,可以提供二维和三维空间信息的真实展现,为用户提供一种直接有效的信息获取形式,便于从复杂的计算结果中发现规律。

其次,方案制定实时性和灾害应急管理的需要。对于突发洪水或其他自然灾害,很难现场获取实时数据资料导致无法较好地制定有效的应急处理方案,通过虚拟仿真,结合数学模型计算结果,可以给出多种应急处理方案供决策者选择,能有效提高方案模型的实时性和交互性,对灾害预防和救援有着极其重要的指导意义。

第三,水利工程设计及论证的需要。利用虚拟现实技术对水利工程建设和多种方案进行仿真,可以虚拟展示工程建设方案的对比效果,能有效降低工程建设风险,减少设计成本,为工程建设和论证提供决策支持。

第四,方案决策支持系统信息综合的需要。虚拟现实技术所构建的三维环境本身就包含了大量的信息资源,综合了系统建模、数据库、网络等多项技术,结合科学计算结果和有效的开发技术,可以更加综合地为水资源管理提供有效、综合的服务。

总之,虚拟流域环境研究是“数字流域”的重要研究内容,能为科学开展流域水资源管理、实现“水资源可持续利用”的国家战略提供理论基础与技术支撑,具有重要的科学理论意义和工程实用价值。

1.2 虚拟地理环境概述

虚拟地理环境的兴起具有其历史使命意义。首先,随着计算机技术、通信技术的迅速发展,各种虚拟环境正在不断出现,2007年,Science的文章“The Scientific Research Potential of Virtual Worlds”明确指出构建虚拟空间将成为新一代科学研究和分析的方法(Bainbridge,2007);而微软亚洲研究院也于2012年提出“利用虚拟世界对现实世界进行有效管理及分析是一个值得探索的研究领域”。

在地理领域,一些三维地理信息系统、数字城市等虚拟环境工具被构建并应用于地理空间的认知与分析。但是随着对地观测信息获取网络的快速发展,社会对于大数据时代知识快速获取的需求不断增强,这对于辅助地理认知、地理分析的虚拟环境的构建提出了新要求。首先,传统的虚拟环境由于缺乏机理过程模型的支持,导致无法及时有效地依靠地理知识对海量地理环境数据进行消化;其次,虚拟环境中人与地的关系通常被人为割裂,无法获得一种自然体验;最后,现阶段地理信息科学正从面向地理环境为主体发展到面向以人为主体,从面向地球系统科学的研究发展到面向社会的公众应用阶段,传统封闭式的空间信息研究平台已经不能很好地满足当前地理研究的需求,一个支持多领域专家及公众协同参与的开放式新型工具亟待开发。

相对于以地理编码数据库为“单核心”的地理信息系统,虚拟地理环境的特色在于其拥有“双核心”,即空间数据库和地理模型库两个核心。基于此,虚拟地理环境实现了地理可视化、地理模拟、地理协同与用户沉浸式参与等功能。Goodchild 在论述新一代地理信息系统的未来发展时,提出五个必须关注的点(Goodchild, 2009a),虚拟地理环境的建设满足了其中三维可视化、动态过程模拟与公众参与三个关键点。因此,可以认为虚拟地理环境是满足人类空间认知需求发展到第三阶段的必然产物,是辅助人类进行动态现象、过程探索及演变规律挖掘的重要工具,当然也可以理解为新一代地理信息系统的雏形。

1.2.1 虚拟地理环境的概念

虚拟地理环境(Virtual Geographic Environment, VGE)起源于 Michael Batty 于 1997 年提出的虚拟地理学(Batty, 1997)。其后几年,该概念以不同名称陆续出现在相关刊物上(Lin 等, 1998; Gong 等, 1999; Lin 等, 1999)。直到 2001 年,虚拟地理环境才正式得以命名(Batty, 1997; Lin 等, 2001)。虚拟地理环境从提出以后经过多年的发展,也逐渐在深化、明晰。它起初是依据虚拟现实与地理学的集成思考后形成的一个概念,主要是针对现实地理系统而言,是现实地理环境的表达与模拟。随着网络赛博空间以及分布式虚拟现实的发展,虚拟地理环境把化身人包括进来,从而形成了既可以指向现实地理系统的模拟环境,也可以指网络上基于化身的虚拟世界。这样,虚拟地理环境就可以定义为是以化身人、化身人群、化身人类为主体的一个虚拟共享空间与环境,它既可以是现实地理环境的表达、模拟、延伸与超越,也可以是指赛博空间中存在的一个虚拟社会(社区)世界。其中的化身人、化身人群、化身人类是表示现实世界中的人与虚拟世界中的化身相结合后的集合体。上述这个概念的定义,主要是依据地理学中的“地理环境”概念相对应而提出的,地理环境则是指人类生存与发展的地球表层,它包括作为主体的人类社会以及围绕该主体存在的一切客观环境,是由自然地理环境和人文地理环境(经济环境和社会文化环境)相

互联结、相互作用的系统整体(胡兆量等, 1998; 刘南威等, 1998)。

虚拟地理环境概念提出以后, 相关学者也从不同角度进行了思考与理解。闫国年(2011)认为, 虚拟地理环境旨在实现地理环境的模拟分析与表达, 改变传统的空间知识表达与获取方式。相对于 GIS 空间分析, 它更注重通过多源数据整合、共享、集成与信息挖掘, 借助地理分析模型与多感知表达技术, 实现地理问题分析、地理规律提炼、地理现象模拟、地理环境变化再现与预测以及人类活动影响评价, 并通过分布式协同交互, 实现人在虚拟环境中对地理目标与地理现象的互操作, 最终形成新的地学研究技术方法与研究平台。林琿等(2013)认为虚拟地理环境(VGE)是一类以地理特征、地理规律为本源, 以地理感知、地理分析为目的, 利用网络、计算机、虚拟现实等技术构建的开放式地理环境及空间。在这类虚拟空间中, 用户可以身临其境地感知过去、当下及未来的地理现象, 利用定量方法对动态地理过程进行模拟、对地理规律进行总结, 以协同交互的方式开展地理实验, 从而认识世界、设计世界乃至改造世界。上述关于虚拟地理环境的主要观点, 体现了虚拟地理环境的不同研究视角以及侧重点, 但总体来看都是从地理信息技术及信息系统的角度阐述的, 所以该意义下的“虚拟地理环境”也可以特别称为虚拟地理环境(信息)系统。

虚拟地理环境, 从字面上看可以有两种理解(龚建华等, 2010): 一是虚拟“地理”环境, 可理解为虚拟现实(虚拟环境)技术在地球(理)科学领域的应用, 是基于虚拟现实技术设计与开发可以观察、表达与分析关于地理数据、信息与知识的多感知信息系统, 是一种应用工具, 侧重于计算机技术与虚拟环境信息系统, 这个意义上的虚拟地理环境, 也可以理解为虚拟地理环境(信息)系统, 或者地学虚拟环境; 二是虚拟“地理环境”, 虚拟可以理解为形容词, 包括对于现实地理环境的虚拟以及赛博空间中的虚拟地理环境, 它是一种主体(化身人、化身人群、化身人类)生活的客观实在与现实环境。这个时候虚拟地理环境概念重点不在于虚拟现实技术, 而是侧重于应用虚拟现实技术产生的虚拟现实环境本身。在该层次上, 对于地理环境与虚拟位置/虚拟地方/虚拟空间的概念、特征以及本质的理解, 将影响对于虚拟地理环境概念的定义。

1.2.2 虚拟地理环境特征

1.2.2.1 虚拟地理环境的基本特征

虚拟地理环境, 并不只是现实地理环境的简单映射、镜像、复制和模拟, 而是以现实地理环境为基石的一种新的创造。虚拟地理环境的基本特征有(龚建华等, 2010):

(1) 以三维图形符号空间以及虚拟视觉空间为主要媒介和行为舞台环境。

(2) 既可用于表达地球表层系统中的多尺度地理现象与规律, 也可以指赛博空间中的在线虚拟现实。

(3) 是一个地理环境的表达环境, 也是一个以知识创造为目标的实验创新环境。

(4) 以“人”为中心，人既可以是参与者，又可以是旁观者，“人”以化身与智能体表达。人可以是用户，也强调对于地理环境中的“人”的表达。

(5) “虚拟”与人的地理思维、地理认知等相关，表现为主观能动性和创造性。

(6) 是一个主动的、分布式的智能协同虚拟环境。

(7) 是一个地理科学与美学的体验与体认环境。

1.2.2.2 虚拟地理环境系统结构特征

虚拟地理环境，是以沉浸式与分布式虚拟现实技术为基础，从构成虚拟地理环境的软硬件系统、数据、表达与感知来看，它包括五个层面(龚建华等，2001；林琿等，2002；朱庆等，2004)：计算机网络层面、地理数据层面、地理多维表现层面、个人感知/认知层面以及多用户协同工作社会层面。计算机网络层面是有关虚拟地理环境建立的软硬件技术支撑；地理数据层面是有关虚拟地理环境实现的数据组织与集成；地理多维表现层面是对于虚拟地理环境模拟的多模式计算机表达；个人感知/认知层面是对于虚拟地理环境的个体多感知体验与思维表达；多用户协同工作社会层面是对于虚拟地理环境的多用户相互间交流、社会互动与协作。

1.2.2.3 基于参与者社会组织水平视角的虚拟地理环境特征

虚拟地理环境以“人”为核心，从参与者的角度，尤其从参与者在线人数与社会关系自组织结构水平角度，虚拟地理环境可以有不同形式、不同发展阶段的系统种类(图1-1)。参与者从少到多、社会组织水平从低到高(从单人到协同的多人群体、到有组织的社会)，虚拟地理环境特征也从强调地球表层系统的现实地理环境的模拟分析，到强调网络虚拟社区为主的人们之间的交流与交往，展现了虚拟地理环境从探索与研究的实验工具，到可以生活与工作的自组织虚拟社会世界的一个渐进演化。

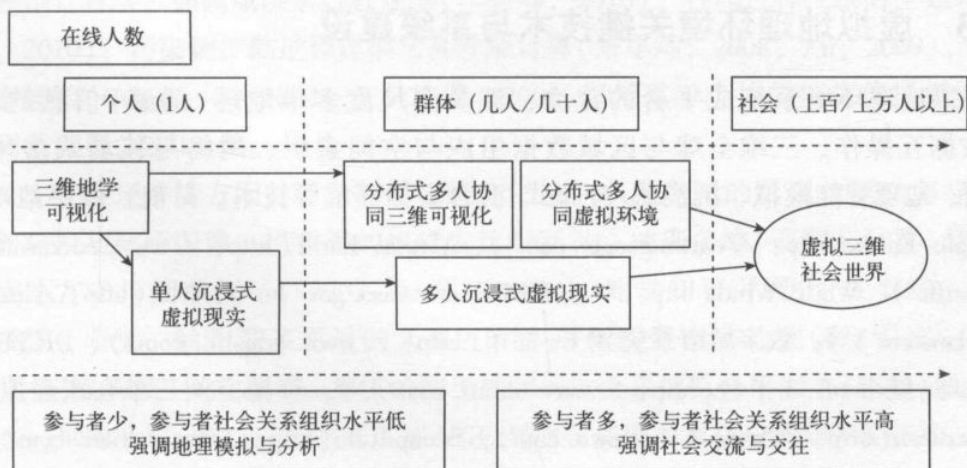


图 1-1 作为实验工具与作为社会交往世界的虚拟地理环境特征(龚建华等，2010)

1.2.2.4 虚拟地理环境与 GIS、数字地球的相互关系

从技术角度来看,虚拟地理环境是二维 GIS、三维 GIS、网络 GIS、虚拟 GIS、地学可视化等的发展与集成(林琚等,2003)。关于从 GIS 到虚拟地理环境的发展趋势,Goodchild(2002)基于移动通信和穿戴式计算机的发展,也提出了关于“GIS 的 3 个发展阶段”以及“(GIS)作为虚拟现实(GIS as Virtual Reality)”的新观点,并明确提出“增强地理现实(Augmenting Geographic Reality)”的概念。他认为地理信息系统(GIS)的发展有三个阶段:第一阶段是 GIS 作为地理学者的研究助手(GIS as Research Assistant);第二阶段是 GIS 作为新的交流媒介(GIS as New Communication Medium);第三阶段是 GIS 作为增强人类感觉地理现实的手段(GIS as a Means for Augmenting the Senses),而这个阶段才刚刚浮现。

关于数字地球与虚拟地理环境,则是从不同背景与视角提出,但具有紧密关联的两个概念(龚建华,1997;龚建华等,2001;Batty,1997)。从发生学角度来看,数字地球是人从宇宙空间遥望地球时以及接近地球时对于“物理空间”的真实感受以及想象而来的,是从感知的“实空间”而来;而虚拟地理环境是从地球上生活的人出发,是对于视觉空间、感知空间以及想象与梦想空间、社会关系交往空间的追求,是从感知的“虚空间”而来(龚建华等,2010)。这也是数字地球与虚拟地理环境概念在产生与形成时的一个实践深层次上的差异,但是从主体的空间体验感以及地球、区域景观的多尺度、多视角统一表达与认识来看,数字地球与虚拟地理环境又是密切关联的。

鉴于当前数字地球与虚拟地理环境的概念认知、系统研发与应用实践,龚建华等(2010)认为数字地球、数字城市、数字地域、数字流域、数字社区等是虚拟地理环境在不同尺度上的表现,而虚拟地理环境可以为它们的研发与应用提供系统的基础理论与方法。

1.2.3 虚拟地理环境关键技术与系统建设

虚拟地理环境系统或平台的建立,涉及多尺度多维地理(遥感)信息的获取、异构数据互操作、三维全球与区域数据组织与空间索引、网络与移动式多用户地学协同、地理智能模拟、沉浸式/分布式/混合虚拟环境等技术。目前,数字地球系统如 Google Earth (<http://earth.google.com/>)、Virtual Earth (<http://www.microsoft.com/virtualearth/>)、World Wind (<http://worldwind.arc.nasa.gov/>)、天地图 (<http://map.tianditu.gov.cn/>)等;数字城市系统如 E-都市 (<http://www.edushi.com/>)、DICITI 三维数字地球(城市)在线平台 (<http://www.diciti.com/>)等;赛博空间三维在线虚拟社区,如 Cybertown (<http://www.Cybertown.com>), SecondLife (<http://secondlife.com/>)等都是现实全球、城市尺度上以及赛博空间“虚拟”角度下的虚拟地理环境原型表现。

基于虚拟地理环境的结构特征,结合地理环境多维现象与过程的观察数据和建模特点,虚拟地理环境系统的建设,具体涉及数据环境、模型环境、表现环境、协同环

境四个方面,如图 1-2 所示。

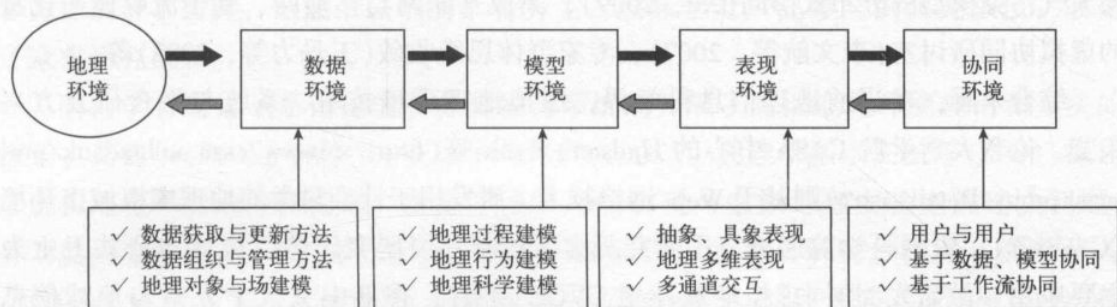


图 1-2 虚拟地理环境系统四个模块的建设框架(龚建华等, 2010)

(1) 在数据环境方面,虚拟地理环境的建设包括三维数据获取与更新,多尺度(全球、区域等)海量多维(三维以上)数据的高效组织与管理,分布式环境下的数据组织与调度,地理对象与场的三维建模,城市地上地下、室内室外三维一体化模型,赛博空间三维虚拟城市建模等。如基于地面与机载的激光雷达大规模的三维地形与城市的 DEM 快速获取(何秉顺等, 2009; 李清泉等, 2003),基于多角度的航空摄影三维城市建模(<http://www.pictometry.com/government/products.shtml>),基于数码相机与数码摄像机的三维快速重建(刘亚文, 2004),自发地理信息(VGI)支持下的三维数据获取与建模(Goodchild, 2009b),人群模拟中的行为数据采集(胡碧松, 2009),城市地上与地下一体化三维建模(丛威青等, 2009),基于多面体(正二十面体等)的全球三维剖分与数据组织(袁文, 2004)等。

(2) 在模型环境方面,涉及地理环境多个圈层、自然与人文等多个专题的相关地学模型,具体包括地理过程、地理行为等的三维建模以及基于高性能或普通 PC 机集群等的模型计算等。如流域洪水过程建模(李毅等, 2010),台风过程三维时空建模(王长波等, 2010),污染物扩散过程建模与高性能计算(朱军等, 2008; Xu, 2009),火灾人群疏散模拟(Gwynne 等, 2001; 王长波等, 2008)以及基于个体的疾病传播模拟(龚建华, 周洁萍等, 2006)等。

(3) 在表现环境方面,可以包括二维、三维、多维之间的可视化联动与导航,三维几何建模与数码图像、视频等的集成表达与互动,地理多维(观察与计算)数据的可视化表达方式与技术(Guo, 2007; Li 等, 2009),地学知识可视化(王伟星, 2009),基于视觉、听觉、触觉等多通道的人机互动,户外增强现实地理信息系统(杜清运, 2007),三维场景中 StreetView 提供的基于视频街道全景浏览(<http://en.wikipedia.org/wiki/GoogleStreetView>),三维非真实感 VGE 与地学多维可视化分析学(孟丽秋, 2006),基于化身的人与环境的交互模式(Lin 等, 2002)等。

(4) 在协同环境方面,则是指服务于分布式多用户之间的交流、交互协同工作,包括基于数据、基于模型、基于工作流、基于化身等的地理协同方式,集聚知识表达

与分析综合,基于认知的协同表达,协同研讨室的构建等。例如,基于大气污染数据与大气污染模型的分布式协同(Xu, 2009),集成互联网与移动网、基于流媒体与化身的虚拟协同研讨室(李文航等, 2007),专家群体思维收敛(王丹力等, 2002)等。

综合来看,在当前地理信息科学界,虚拟地理环境技术、系统与平台研发方兴未艾。伦敦大学学院 CASA 中心的 Hudson-Smith 等(<http://www.casa.ucl.ac.uk/projects/projectDetail.asp?>)则基于 Web/网格技术,研发用于社会科学的地理虚拟城市环境(GeoVUE),中国科学院遥感应用研究所虚拟地理环境研究团队以流域与公共卫生为主要应用领域研发“协同虚拟地理环境 CVGE”平台,香港中文大学太空与地球信息科学研究所基于国家“863”项目研发面向空气污染模拟的虚拟地理环境系统,南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室在集成了大量地学模型的基础上研发虚拟地理环境平台,武汉大学虚拟现实实验室研发了以三维数码城市为主要应用领域的 VEGIS 系统等。

应该认识到,基于网络的数字地球系统 Google Earth、Virtual Earth 与天地图的建立与广泛应用,大大推动了虚拟地理环境系统与平台的研发,但是,包括大气圈、水圈、岩石圈、土圈、生物圈、人类智慧圈及其圈层之间相互联系与作用的地球表层系统的三维立体与动态多维表达,全球与区域层次的大规模人群活动与流动,多用户地学协同,赛博空间中具有大规模虚拟化身活动的虚拟社区与现实社区的集成等方面的研究与技术研发还很薄弱,需要进一步探索与发展(龚建华等, 2010)。

1.3 虚拟地理环境的研究进展

在陈述彭的指导与建议下,基于地学可视化、地学多维图解和虚拟现实技术的发展思考以及“开放建模环境”的设计与建设,虚拟地理环境的思想从 1997 年起逐渐形成,并于 2001 年通过《虚拟地理环境——在线虚拟现实地理学透视》的专著出版,正式建立了虚拟地理环境的概念与系统框架(龚建华, 1997; Gong 等, 2000; 龚建华等, 2001; 林琚等, 2002)。

虚拟地理环境提出以后,日益受到学术界的关注与重视,也逐渐发展为地理信息科学的一个前沿研究领域。国内已经有不少科研院所如香港中文大学、中国科学院遥感应用研究所、南京师范大学、武汉大学等招收了与虚拟地理环境专业相关的博士研究生。同时,南京师范大学在 2005 年成立的“虚拟地理环境教育部重点实验室”,为虚拟地理环境的系统化、持续研究与应用实践,建立了学术组织基础。众多学者从虚拟地理环境的概念与特征(林琚等, 2003, 2005; 龚建华等, 2010; Lin 等, 2010a; Konecny, 2011; Priestnall 等, 2012)、组成结构与功能(Lü, 2011; Lin 等, 2013; 林琚等, 2007)、相关实现技术(苏红军等, 2009; Wen 等, 2012; Chen 等, 2008)、应用领域与具体案例(Goodchild, 2009b; Xu 等, 2010; Lin 等, 2010a,