

引文格式:王家耀,武芳,闫浩文.大变化时代的地图学[J].测绘学报,2022,51(6):829-842. DOI:10.11947/j.AGCS.2022.20210661.  
WANG Jiayao, WU Fang, YAN Haowen.Cartography: its past, present and future[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 829-842. DOI:10.11947/j.AGCS.2022.20210661.

# 大变化时代的地图学

王家耀<sup>1</sup>,武芳<sup>2</sup>,闫浩文<sup>3</sup>

1. 河南省时空大数据产业技术研究院,河南 郑州 450046; 2. 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州 450001; 3. 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州 730070

## Cartography: its past, present and future

WANG Jiayao<sup>1</sup>, WU Fang<sup>2</sup>, YAN Haowen<sup>3</sup>

1. Henan Institute of Technology for Spatio-temporal Big Data Industry, Zhengzhou 450046, China; 2. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 3. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Currently, cartography, as well as other disciplines such as geography, is at a time of great revolution. While cartography is making progress continuously, various “trend of thoughts” and “points of view” appear, such as “is cartography marginalized?” and “where should cartography go?” These arise great concerns in the circles of both academy and industry of geoinformation. To answer the questions, firstly, this paper briefly introduces the development history of cartography, including reviewing the three times of rise in the history of cartography. It is not forgetting the past that can go to the future successfully. A review of the history of cartography is for the purpose of making cartography walk to the future better. Secondly, the achievements of contemporary cartography are analyzed, including the discipline systems of cartography, new minds, new thoughts and new methods in cartography, intelligent map generalization and cascade renewal of multiscale maps, social influences of maps, and inexhaustible driving forces of cartography development. It is to know present that can start a good future. Finally, to play the leading role of cartographic philosophy in innovative development of cartography, the paper addresses the development of cartography promoted by artificial intelligence and the achievements in visualization of spatio-temporal big data and visual design. It deems that cartography will certainly develop at an integrated direction of both high differentiation and high synthetization, and the rerise of cartography is the great trend of the time.

**Key words:** map; cartography; spatio-temporal big data; artificial intelligence

**摘 要:**当前,地图学同其他科学(如地理学)一样处在一个大变革时代。在地图学不断进步的同时,也出现了各种各样的“思潮”或“观点”,地图学是否被边缘化了?地图学应该向何处去?这是测绘地理信息学界和业界都十分关心的问题。本文首先简要梳理了地图学发展的历史进程,回顾了地图学史上的三次崛起,不忘过去才能继往开来,回顾地图学的历史是为了让地图学更好地走向未来;其次,从地图学学科体系、地图设计的新理念新思维和新方法、智能地图制图综合及多尺度级联更新、地图的社会影响力、地图学发展的不竭动力等方面,分析了当代地图学的发展成就;然后,强调了地图哲学思维对地图学创新发展的引领作用,侧重分析了人工智能推动地图学发展、时空大数据可视化及可视化设计的研究重点等;最后,分析认为,地图学必将沿着高度分化和高度综合的整体化方向快速发展,地图学再度崛起是时代之大势。

**关键词:**地图;地图学;时空大数据;人工智能

中图分类号:P208 文献标识码:A 文章编号:1001-1595(2022)06-0829-14

早的文化同样悠久的历史。地图学又是一门充满生机与活力的科学,在长期演进发展中不断充实和完善,如今已成为一门具有完整的理论体系、现代化技术体系、应用服务体系和跨越时间与空间、自然与人文、技术与工程的科学。可以说,任何时期、任何社会都不可能没有地图和地图学,因为地图和地图学是在数千年的人类社会实践、生产实践和科学实践的基础上形成和发展起来的。

20 世纪 50 年代信息论、系统论和控制论三大科学理论的提出,以及计算机科学与技术的兴起与发展及其在地图制图中的应用,把地图学带进了信息时代,从此地图学进入了快速发展时期。

随着现代网络技术、智能感知智能互联技术、大数据技术和计算机超强计算能力的快速发展,地图学也进入了一个大变化时代。一方面,这为地图学的进一步发展提供了新的机遇;另一方面,学界和业界也出现了一些疑惑或疑问,如“遥感影像分辨率这么高还需要地图吗”“遥感影像丰富的信息都被地图制图搞没了”“实景街景是否可以取代地图了”等,甚至怀疑“地图学是否被边缘化了”。与此同时,又提出了不少“新名词”。正是在这样的背景下,许多长期从事地图学研究、教育和产业的学者和工程技术界的朋友都在问:地图学到底向何处去? 本文试图就此进行一些探索和分析。

## 1 不忘以往才能继往开来——地图学历史上的三次崛起

在地图学发展的历史长河中,地图文明同人类文明一样,正是在“变”与“不变”的对立统一中不断前进的。地图学通过“时间效应”和“空间效应”的双重作用,在时间的坐标上,一次又一次地发生形态嬗变;在空间的坐标上,一次又一次地扩展地域的范围,由局部到全球<sup>[1]</sup>。笔者将地图学数千年的发展历史总结为“三次崛起”。

### 1.1 古代地图学的形成

古代地图学的形成,以中国裴秀的《禹贡地域图十八篇·序》和古希腊托勒密的《地理学指南》为标志性成果。

古希腊的托勒密(公元前 90—168)和中国的裴秀(224—273)好似两颗东西辉映的灿烂明星。托勒密的《地理学指南》和裴秀的《禹贡地域图十八篇·序》标志着古代地图学的总结性成就,反映了东方和西方两条不同的认知路线和发展特点。在东方(中国),古代地图学经历了春秋战国时期

的禹贡地图、秦汉舆地图、南北朝裴秀地图,是一条半封闭陆地局部地区大比例尺地图应用到制图经验总结的认知路线;在西方(欧洲),古代地图学经历了荷马地图、爱奥尼亚地图、埃拉托色尼地图、托勒密地图,这是一条开放型从想象到实证的大区域小比例尺海洋图的认知路线。毋庸置疑,托勒密的《地理学指南》和裴秀的《禹贡地域图十八篇·序》奠定了古代地图学的基石,对后来地图学的发展产生过长期而深远的影响。从中国著名航海家郑和(1371—1435)揭开 15 世纪海上探险的序幕,到 17 世纪中叶意大利人哥伦布(1451—1506)、葡萄牙人达·伽马(1469—1524)和麦哲伦(1480—1521)等的地理大发现,基本上奠定了世界地图的轮廓;意大利传教士利玛窦 1582 年来到中国,沟通、总结了地图学和地理学知识,在中国学者的支持与合作下,于 1602 年采用等积投影和经纬线网制图法编绘了《坤舆万国全图》。这两件事标志着东(中国)、西(欧洲)方古代地图学的交叉融合,推动了地图学的发展。

### 1.2 近代地图学的形成

近代地图学的形成,以大规模三角测量和地形图测绘、航空摄影测量、地图编绘和照相制版印刷技术为标志性成果。

随着资本主义的发展,航海、贸易、军事及工程建设越来越需要精确详细的更大比例尺地图,加之工业革命后科学技术水平得到了提高,新的高精度测绘仪器相继发明,许多国家进行了大规模全国性三角测量,为大比例尺地形测图奠定了基础;采用平板仪测绘地形图使地图内容更加丰富,表示地面物体的方法由原来的透视写景符号改为平面图形,地貌由原来的透视写景表示改为等高线法,使地图具有了可量测性;地图编绘方法与技术不断进步,地图印刷由原来的铜版雕刻发展到平版印刷。

西方科学制图方法在我国引起重视,是从清初康熙年间测绘《皇舆全览图》开始的,后来乾隆在此基础上编制成地图集《乾隆十三排地图》(也称《乾隆内府地图》),最终完成我国实测地图,并推动了各省区地图集的编制,成为我国古代制图法向近代制图法转变的标志。其中,清末地理学家魏源编制的《海国图志》是我国采用新法编制的第一部世界地图集,其特点是完全脱离了中国传统的计里画方法而采用经纬度制图法,统一起始经纬度,根据制图区域面积大小和所处地理位置

选用相应的地图投影和地图比例尺。尽管还存在不少缺点,但其仍不愧为中国地图学史上一部关于世界地图集方面的开创性著作。随着19世纪自然科学的进步与深化,出现了编制专题地图(集)的热潮,其中,杨守敬集他人之大成编制的《历代舆地沿革险要图》,是中国历史沿革地图史上旷世绝学的一部历史沿革地图集,为我国历史地理学和历代沿革地图的发展做出了不可磨灭的贡献。

20世纪初航空技术的发展,很快研制出航空摄影机和立体测图仪,从此地图测绘开始采用航空摄影测量方法;照相和平版彩色胶印技术的应用,使地图特别是专题地图的科学内容、表现形式和印刷质量提高到了一个新的水平。至此,大约在20世纪50年代末和60年代初,地图学已经形成具有地图投影、地图编制、地图整饰和地图印刷等分支学科的一门独立的学科。

近代地图学的形成给我们两点启示:一是与地图学直接相关的地理学、测量学、印刷学为近代地图学的形成与发展提供了外部条件,这是外因;二是地图学本身在漫长的地图生产过程中积累了丰富的实践经验,不同历史时期地图学家们发展和丰富了地图学的理论、方法和技术,这是内因。内因和外因共同推进了近代地图学的形成和发展。

### 1.3 现代地图学的形成

现代地图学的形成以计算机地图制图技术的里程碑式变革为标志。

近代地图学是地图生产之本,长期指导着地图的生产,但是它存在3个明显的缺陷:一是以经验总结为主,忽视基本理论研究和建设;二是以联系测绘学科为主,忽视与更广泛学科之间的联系;三是以地图制作为主,忽视地图应用特别是忽视制图者自身的认识活动和地图使用者的认识活动的规律研究<sup>[2]</sup>。这种情况下,地图学要获得实质性进展是很困难的,这就迫使地图学家们不得不思考如何走出地图学的这种“封闭体系”而向系统外部寻求地图学进一步发展的源泉。信息论、控制论、系统论三大科学理论问世和电子计算机的诞生,为地图学的发展带来了新的活力。从此,地图学进入了新的发展时期<sup>[3]</sup>。

当地图学家们在思想上认识到近代地图学的缺陷并走出其“封闭体系”后,伴随而来的是地图制图技术上的革命和地图学理论上的创新。地图

制图技术革命的主要标志性事件是:计算机技术的发展促进了自动化制图技术的发展,空天地海一体的对地观测数据成为地图学的主要信息源之一,全球卫星导航系统为大中小比例尺地图制图和更新提供精确的位置数据,特别是地图电子编辑出版系统的相继问世,逐步形成了一体化的数字地图制图与出版系统,推动了地图制图技术的根本性变革。数据处理成为地图制图的核心。

技术的变革必然对地图学理论提出新的要求,同时也支撑了地理学理论的研究。正是在此背景下,有学者提出“理论地图学”,随后相继提出了“地图模型论”“地图信息传输论”“地图视觉感受论”“地图空间认知”等一系列新理论,将地图学探索的广度和深度向前推进了一大步<sup>[4]</sup>。地图制图技术和地图学理论是推动地图科学不断前进的两个“轮子”。在这两个“轮子”的推动下,地图学融入了信息社会。

历史是一面镜子,历史是最好的老师。回顾地图学史上的三次崛起,可以坚定地图学的自信。这就是为什么最近几年来国内外十分重视研究出版古代地图(集)<sup>[5-11]</sup>和地图学史著作的缘故<sup>[12-21]</sup>。不忘以往,才能继往开来。

## 2 认识现在才能开创未来——现代地图学的发展与成就

当代地图学发展形势如何?这是学界和业界都十分关心和正在认真思考的问题。

### 2.1 地图学跨学科特色开始凸显

关于地图学的学科体系,近半个世纪以来有许多学者提出过自己的主张:奥地利的克雷奇默尔(I. Kretschmer)把地图学分为理论地图学和实用地图学,前者属于研究工作的领域,后者又分为描述地图学和分析地图学,界定为产品的应用领域<sup>[22]</sup>;德国的费赖塔格(U. Freitag)将地图学分为地图学理论、地图学方法论和地图学实践<sup>[23]</sup>;高俊把地图学分为3个层次,即基础理论、应用基础和技术方法<sup>[24]</sup>;廖克把地图学分为理论地图学、地图制图学和应用地图学<sup>[25]</sup>;王家耀把地图学分为理论地图学、地图工程学和地图应用学<sup>[4]</sup>。

作为一门研究地理信息表达、处理和传输理论与方法的学科,地图学与测绘学(测绘科学与技术)内部的地理信息系统、摄影测量学、遥感和大地测量学以及地理学等相邻学科有着许多天然的重叠<sup>[26]</sup>。除地图学自身的体系外,王家耀还提出



了与地图学相关的两个“外层”学科体系:作为第一外层的认知科学、系统科学、信息科学、心理科学、语言学、数学、地球与环境科学;第二外层的自然科学、社会与人文科学、技术与工程科学<sup>[4]</sup>。反映了地图学正向广度和深度发展。

上述地图学同其所属测绘学和地理学的关系、地图学同所属学科体系之外的更深层次学科之间关系的分析研究,表明了现代地图学的跨学科特色。正因为这种跨学科特性,才使地图学这个“百花园”里出现了一系列有代表性的、跨学科特色的地图学著作<sup>[27-34]</sup>。这些都正是当今跨学科和学科交叉融合的结果,当代地图学家们要主动参与到跨界融合的“洪流”中来。

## 2.2 地图学社会影响力更加强大

地图学是人们在长期社会实践中创造的认知非线性复杂地理世界和在指导自己行动的过程中形成的一门科学<sup>[35]</sup>,且任何时期、任何社会都不可或缺。

地图学的这种社会影响力的源泉在哪里?从根本上讲,因为地图作为地图学的研究“对象”,它不仅通过科学抽象(地图投影、地图符号、地图综合)完成由“地理世界”到“地图世界”的转变,而且能通过地图空间认知实现由“地图世界”到“地理世界”的转变,使之成为人们认识世界和改造世界的一种科学工具<sup>[35]</sup>。

任何地图都经过科学抽象,一切正确的科学抽象,都更深刻、更正确、更完全地反映着自然<sup>[36]</sup>。而地图正是从地理世界中抽象、概括出各种要素(现象)的数/质量特征、空间分布、空间结构和空间关系及其在时空域的变化科学方法<sup>[35]</sup>。其中,地图投影决定了地图的可精确量测性,地图符号决定了地图具有跨越语言和文化且最易于为社会所接受的地图语言学特性,制图综合决定了地图与实地及多比例尺地图之间具有可度量的相似性和客观性。所以,地图是传递地理空间信息的最佳方式。“地图的最初使用必然会在思想领域引起一场革命”“一个时代和一种文化没有任何形式的地图是难以想象的”<sup>[37]</sup>,这就是地图的力量。

当代地图学的社会影响力比以往任何时期都更加强大,因为作为地图学研究对象的地图,比以往任何时期都更加广泛、更加深入地扎根于社会的土壤之中。在科学研究方面,通过地图揭示科学规律(如大陆漂移和大陆板块学说),利用地图

研究各种地理要素或现象的空间分布规律、相互联系和制约关系以及动态变化等,也可以利用地图对自然条件、土地资源和环境质量进行综合评价。在国民经济建设方面,利用地图进行区划并制作区划地图,进行规划并制作规划地图,进行资源勘察、设计和开发,进行各种工程建设的勘察、设计和施工,进行农业土地管理、土地利用和土壤改良等。在国防建设和作战指挥方面,地图为各级指挥机关和指挥员提供作战部署和作战指挥的基本用图,为指挥员认知战场环境和实施图上作业提供共同的地理和地形基础,为数字化战场建设、现代化武器系统和无人作战平台提供数字地图,为国防工程的规划、勘测、设计和施工提供地形基础等。

这里要特别指出的是,当前地图已经成为人们学习、工作和生活最基本的工具和不可或缺的得力“帮手”,尤其是地图集,更被誉为是“重构非线性复杂地理世界”的“百科全书”<sup>[35]</sup>。例如,天气图是现代地图学与地理学最重大的发明之一。天气,日日相接、悬念丛生,既直接影响人们工作、学习和生活,也是亲密朋友之间进行交谈的话题,至于这个故事是通过什么途径告诉我们的,人们却很少谈论。可是,设计制作天气图的思想改变了世界。再比如,导航电子地图既可用于车辆导航定位,也可以用于人们旅游逛街行走的导航定位,是人们生活不可缺少的工具,使人们的出行方式发生了革命性变化<sup>[38]</sup>。

当代地图科学的社会影响力如此之强大,直接导致了地图品种和形式的多样化、参与地图设计制作活动的人的多元化和地图制图人才培养的多元化。实际上,不用说国家、省(自治区、直辖市)级测绘地理信息事业部门,就是一些大型企业的地图制图人员,大部分或相当一部分来自于测绘地理学科专业培养的人才,也有些来自于计算机专业,还有从事地图艺术设计的人才,应该说这是一件好事。正是这种参与地图设计制作活动的人才的多元化,才使得最近一些年出版了一大批令国际学术界赞叹的高水平地图集,形成了地图(集)设计的新理念、新思维和新方法,推动了当代地图科学的发展。

## 2.3 智能化地图综合取得突破

地图上的地理要素的制图综合有其必然性和必要性。一方面,因为人们利用地图认知“地理世界”要解决的问题是多层次的,有宏观(战略)层面

问题(利用小比例尺地图)、也有中观(战役)层面问题(利用中比例尺地图),还有微观(战术)层面问题(利用大比例尺地图),不同比例尺地图的内容的详细程度是不同的、有差别的;另一方面,地图是缩小了的“地理世界”的表象,即使是使用了地图符号系统(地图语言),也不可能将“地理世界”的所有事物及细节都表示到缩小了的有限幅面的“地图”上,而且在“地图重构地理世界”的过程中,还要求保持缩小了的“地理世界”的表象同现实“地理世界”之间具有某种相似性(地理适应性),不同比例尺地图之间也要保持某种可度量的相似性<sup>[35]</sup>。这个问题的解决有其本身的认识论(思维科学)和方法论(科学抽象),前者包括抽象思维、形象思维和灵感思维;后者表现为地图作为缩小了的“地理世界”的模型的转换<sup>[30]</sup>。重要的是,制图综合中的认识论与方法论要求是统一的,这就是制图综合的难点所在。

人们对制图综合的认识和研究之路是漫长的,其演进大体可以概括为4个阶段:由“主观过程”到“客观的科学抽象”的演变;由定性描述到定量描述的演变;由地图模型到基于模型、算法和规则、知识的数字制图综合的演变,以及由单要素研究到把制图综合作为一个全要素、全过程的过程控制和质量控制的演变<sup>[35-43]</sup>。这个演进过程至今已达百年之久。

地图制图综合难题突破的瓶颈是智能化。主要表现在4个方面:①空间目标及其空间结构、空间分布的智能识别;②智能化地图制图综合算法设计;③自动制图综合过程的智能化控制;④制图综合结果的智能化和自动化评价。我国相关高等院校的自动制图综合研究团队,在智能地图综合与多尺度级联更新关键技术及应用方面取得了一系列创新性成果:创建了多尺度地图目标空间关系定量计算的基础理论和描述模型,解决了地图目标相互关系的定量描述和表达难题;创建了地图信息度量准则,发展了空间分布模式识别方法,提出了地理信息变化发现的系列方法,确保地图载负尽量丰富的有用信息;创建了地图自动“综合链”理论、质量评价体系和可视化编辑的过程控制模型,解决了地图综合过程控制和综合结果评价难题;研发了自主可控的全要素、全过程、多尺度地图自动综合级联更新软件平台与应用系统,显著提高了制图综合的自动化程度和智能化水平,缩短了多尺度数据库生成与更新周期<sup>[39-48]</sup>。

## 2.4 大数据增添地图学发展新活力

地图学在其长期发展过程中要解决的第一个难题就是地图制图的信息源问题<sup>[49]</sup>。经历了地图制图资料(纸基地图资料、文献资料)到数据(数字化)再到大数据(社会数字地图)和时空大数据(基础地理时空数据与部门行业专题数据的融合),没有数据、大数据、时空大数据,地图制图就成了“无米之炊”,地图学就成了“无源之水”。

数据,改变了地图学家们的思维。在长期手工地图制图时代,地图制图面对的是图形符号的纸基地图资料和相关文献与统计资料。在这种情况下,对于普通地图制图,实际上是通过编图资料的加工处理和图形制图综合,完成地图编绘作业;对于专题地图制图,则是对相关文献资料描述的专题内容经过处理后以相应的符号表示,或对相关统计数据进行分类(级)处理并选用相应的表示方法。而到了以数值数据为地图学信息源的时代,数据处理就成了地图制图的核心,地图制图学进入了更加严密的理论研究和模型应用阶段。道理很简单,要利用计算机对制图数据进行处理,就必须应用数学方法;在计算机地图制图的情况下,制图数据处理的结果也需要用相应的制图模型来表达。即制图数据处理与制图表示都由计算机来实现,这就形成了“原始数据的特征分析与预处理→数学模型的设计与建立→数据处理→制图模型的设计、建立及其解释”的新体系<sup>[31]</sup>。不过,这个时期的地图制图数据是以“样本”数据为基础的。

大数据,为地图学的发展增添了新活力。因大数据具有数据体量大、数据类型多、处理速度快、价值密度低等特点<sup>[50]</sup>,于是,就出现了以空间数据模型、空间数据索引、空间数据操作及其查询语言为内容的空间数据库理论、方法与技术的研究,奠定我国数字地图制图发展的基础<sup>[51-70]</sup>;设计建设一批空间数据库工程,开展空间数据库功能扩展和空间数据质量标准及数据安全方面的研究,奠定了国家空间数据基础设施基础<sup>[71-82]</sup>;针对多源异构空间数据的应用,开展空间数据集成、融合与同化理论及空间数据共享关键技术和共享机制的研究,为提供一致性时空数据服务奠定了基础<sup>[83-92]</sup>;空间数据挖掘领域的研究有了良好的开端,在基于时空统计分析,基于空间关联规则,基于求解问题不确定性,基于形、数、理统一的可视化,基于人工智能和各种方法联合运用等的空间数据挖掘与知识发现等方面取得一系列成

果<sup>[93-97]</sup>。大数据推动了地图学理论、工程技术和应用研究的深化和系统化。

时空大数据成为地图学发展的核心驱动力<sup>[50]</sup>,主要表现在:一是为地图学的发展提供了时空观和方法论支撑。地图从一开始就是人类活动在一定空间和时间认知世界和改造世界的产物,地图学是跨越时间和空间的科学,可以称之为“时空地图学”。从空间范围来讲,地图学可以用地图表达月球表面、地球表层、海洋、网络空间态势,即深空、深地、深海、深蓝(网络空间)等,都成了地图学研究和表达的对象;从时间序列来讲,地图学可以用地图表达过去、现在和未来<sup>[98]</sup>;从表达的地理内容来讲,地图学是跨越自然与人文的科学。所以说,地图是诠释世界的杰作,是浓缩历史的经典<sup>[16]</sup>。二是推动地图学进入“数据密集型计算”为特征的第四科学范式新时代。人工智能“三要素”的时空大数据、算法和计算能力,特别是自主算法尤其是智能算法的研究,必将快速推进多源异构时空大数据集成融合同化处理、全要素全过程智能化多尺度时空数据库的自动生成、时空大数据挖掘与知识发现等的深入研究,全面推进当代地图学向更高水平发展。

由数据到大数据再到时空大数据,既是人类社会生产活动、科学实践活动、军事作战活动等发展的结果,也是人类认识思维活动深化的结果,作为地图学发展的不竭动力,其影响十分深远,同时也成了地图学与其他科学技术交叉融合的催化剂。

### 3 学科交叉推进智能制图——地图学发展进入新时代

地图学的进一步发展,需要地图辩证思维的引领,需要人工智能技术的推动,需要多学科交叉融合的智能制图关键问题的解决,更需要服务国家发展战略。

地图辩证思维,是地图学与哲学的汇合,有着严密逻辑系统的地图学时空观,是关于地图同其表达对象、地图同制图者、地图同用图者、制图者同用图者、地图同地图之间的关系总体思考,是关于地图设计生产与应用、地图学理论与工程、地图(学)的过去现在与未来的基本规律<sup>[99]</sup>,也是地图学的最高总结。地图学的持续发展,需要运用哲学辩证思维后思地图学的过去、分析认识地图学的现在和前思地图学的未来,才能更好

把握地图学的“变”与“不变”的辩证法,以及在“变”与“不变”的对立统一中不断发展的基本规律,并站在地图学发展的前沿引领地图学的发展。

#### 3.1 人工智能时代催生地图学发展新机遇

人工智能是计算机科学的一个分支。自从大卫·希尔伯特 1900 年宣布与人工智能有关的两个世界性难题以来已经过去了一百年,经历过梦想期(梦想探索,1900 年)、推理期(人工智能元年,1956 年)、知识期(专家系统,1960 年)和学习期(自下而上的启发式,1980 年至今),特别是近 10 年来脑科学、智能感知技术和物联网技术的快速发展,人工智能正在催生新的产业,“智能+”正在快速跨界发展<sup>[100]</sup>。但是不能忘记,20 世纪 60 至 90 年代,国内外都曾出现过“专家系统”研究的热潮,可是后来热潮不在了,这是因为当时“人工智能工作似乎急于求成,而基础理论工作不扎实”<sup>[101]</sup>。“人工智能研究在 20 世纪 60 至 70 年代取得了很大进步,但随后走上了错误道路”,“过去 20 年中 AI 本来是应该取得更大进展的,问题发生在 20 世纪 80 年代,AI 研究的资金开始枯竭,研究人员开始尝试探索商业化 AI,由此产生的最大问题是 AI 研究的狭窄和专业化,而基础问题研究无人问津,没有进展。因此主张回归早期的研究模式,让狭窄的应用驱动研究回归到好奇心驱动研究。没有理论指导,研究工作就不可能持久”<sup>[102]</sup>。后来的事实证明,人工智能“回归基础研究”后确实出现了好的转机,基础研究取得一大批理论成果<sup>[103]</sup>。近年来,人工智能发展迅猛,已在模式识别、自动驾驶、机器翻译、遥感影像分类识别等领域得到广泛应用。在地图学领域,智能化地图制图特别是制图综合也取得许多新进展<sup>[104-110]</sup>。这些,都标志着人工智能时代的到来已是时代之大势。

人工智能时代的到来给地图学的下一个辉煌提供了难得的历史转机,同时也提出了严峻挑战。就人工智能推动地图学新时代的到来而言,当前及今后相当长的一个时期内,应着重研究 3 方面的问题。

一是抓住大数据时代机器学习的新浪潮,开展地图学领域深度学习等算法的研究和应用,实现“由基于统计方法的神经网络到基于时空大数据方法的神经网络”的转变,充分利用时空大数据教会计算机自己学习,解决地图学特别是地图设计、制图综合方面的“知识工程”瓶颈问题,其中特



征提取和表示是关键。

二是抓住类脑智能研究这个人工智能领域的新方向,开展面向智能地图制图的基础研究,涉及“人脑地图”与人类大脑皮层成像和重组的机理、地图学专家基于脑机理研究的制图信息处理的途径、类脑计算模型和算法及计算架构,需要地图学家和类脑智能专家的结合。近年来脑科学、神经科学、认知科学和人工智能技术取得可喜的进展,有望为面向地图学领域的类脑和类脑智能研究提供借鉴,要坚持跨界学习与合作,实现计算机人工智能与人类智能的深度融合<sup>[38]</sup>。

三是抓住人工智能“三要素”,使之成为大规模智能化地图制图生产的核心驱动力。其中,算法是机器学习的核心和引擎;时空大数据是人工智能的动力,没有时空大数据,算法就不起作用;云计算支撑的计算能力是一种新的计算模式,具有时间弹性和空间弹性,支撑“地图制图综合”处理的分布式、协同化和智能化,采用分布(任务分解)、并行(多个节点按工作流并行处理)、协同(算法调度、各要素相互关系和各个任务“分块”协同处理)模式<sup>[38]</sup>,最终给出“地图制图综合”的解,以此来取代目前的“以图幅为单元的单人、单机、单系统模式”,以提高地图生产的智能化水平和自动化程度,进一步缩短地图生产与更新的周期,服务国家和军队需求。

### 3.2 时空大数据可视化增显地图学功能与价值

时空大数据可视化及可视化设计的过程是一个以“数据密集型计算”为特征的过程,超越一般的地图可视化和空间信息可视化,面对的是大规模海量数据流及不同类型不同层次用户要解决的问题的差异,需要解决可视化主题多变、形式多样、快速、直观易理解以及强交互等一系列难题。主题多变指决策问题的多变性;形式多样指可视化形式的多样化;快速不仅指数据变化快,而且处理速度要快,做到事先而非事后;直观易理解指用户很容易发现和理解隐藏在数据中的知识;强交互指用人机协同的智能化方法完成时空大数据可视化过程。

因此,时空大数据可视化设计是十分重要的,而且人们追求的是相对最好的时空大数据可视化设计<sup>[111-112]</sup>。所谓“最好的时空大数据可视化设计”:一是总体上必须是形(图形、图像)、数(广义的数据)、理(规律)相统一的可视化,形表达数据,数理蕴含规律;二是必须知道数据表达或蕴含了

什么,数据和它所表达的事物(现象)之间的关系是什么,这是时空大数据可视化的关键、全面分析数据的关键和深层次理解数据的关键,因为时空大数据可视化本身就是一种数据挖掘与知识发现方法;三是必须遵循空间认知科学和视觉规律,人们对“可视化”的感知、表象、记忆和思维,是一个完整的空间认知过程,这个过程快速实施有赖于符合视觉感受规律的时空大数据可视化设计,这种设计可以洞察统计分析很难甚至无法发现的新模式、新知识和新规律,知识水平较低的用户也易于对可视化结果进行解读;四是应该针对不同类型不同层次用户的差异性,用户不同,可视化产品或方式也应不同,但目前应用最多的还是各种多样化、个性化的地图,因为地图本质上是通过反映事物(现象)的空间结构和空间关系及其随时间变化来揭示事物的规律的。文献[113]通过地图上居民地的空间分布规律揭示霍乱病根源就是一个典型例子,在数据可视化领域产生了深远影响。

### 3.3 多学科交叉融合加快地图学创新与发展

高度分化与高度综合是当代科学技术发展的重要趋势,地图学也不例外。其主要原因在于当代科学技术的快速发展和科技创新步伐的加快。按照计算机图灵奖得主 Jim Grey 的 4 个科学范式,从几千年前的第一范式,几百年前的第二范式,几十年前的第三范式,到今天正在出现的第四范式即数据密集型计算范式,科学范式的演进周期越来越短,地球空间信息科学及其所属的地图学的科学范式演进周期也是如此。正是在这种情况下,地图学领域的各种新思想、新概念、新名词、新方法、新技术和新成果“潮水般”奔腾而来,地图学正呈现高度分化的趋势,似乎不知道地图学的主题和本质是什么。但是,高度分化最终必然导致高度综合。

站在 21 世纪 20 年代的新起点上,按照系统科学和系统工程理论<sup>[114-115]</sup>,地图学正呈现出同其所属的测绘科学与技术 and 地理科学各分支学科的交叉融合,与其所属学科以外高层次的认知科学、系统科学、信息科学、神经心理科学、语言学、计算机科学、人工智能的交叉融合,与其所属学科以外更高层次的自然科学、社会与人文科学、技术与工程科学、数学、哲学的交叉融合(图 1)。这种多层次的学科之间的交叉融合,必然会衍生出各种新的研究领域,甚至会形成新的分支学科。例如:地图学与认知科学和神经心理学交叉融合,产

生地图空间认知新领域,形成地图空间认知科学、脑地图学<sup>[116]</sup>等;地图学与系统科学的汇合,产生地图系统工程新领域,形成地图系统工程学;地图学与信息科学的交叉融合,产生地图信息新领域,形成地图信息科学;地图学与语言学的交叉融合,产生地图语言学新领域,形成地图语言科学;地图学与计算机科学技术交叉融合,产生数字地图和电子地图新领域,形成数字地图学和电子地图学;地图学与人工智能交叉融合,产生智能地图制图新领域,形成智能地图制图学,等等。就地图学与其所属学科以外更高层次的科学技术而言,地图科学与自然科学的交叉融合,产生一系列自然地图新领域,形成自然地图制图学,可细分为水文地图制图学、地质地图制图学、地貌地图制图学、土质与植被地图制图学,等等;地图学与人文社会科学交叉融合,产生一系列人文地图、社会地图、经济地图和历史地图等新领域,形成人口地图制图学、文化地图制图学、社会地图制图学、经济地图制图学和历史地图制图学,等等;地图学与技术工程科学交叉融合,产生地图技术、地图工程等新领域,形成地图技术科学和地图工程科学;地图学与数学的交叉融合,产生地图数学新领域,形成数学地图学;地图学与哲学汇合,产生地图哲学新领域,形成地图科学哲学、技术哲学和工程哲学,等等。

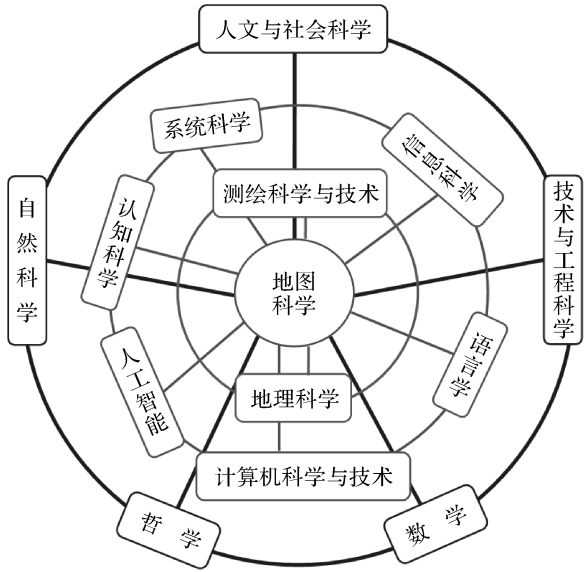


图1 地图学与其他学科的关系

Fig.1 The relationship of cartography and other subjects

多学科交叉融合必须服务于国家需求<sup>[117]</sup>。地图科学的高度分化必然导致高度综合,地图的

类型和品种除定制化和精准化的国家、军队基本地图及各部门专业用地图外,满足社会需求的内容个性化、形式多样化地图也越来越成为一种趋势,与之相应的地图学的内涵、外延也在不断深化和拓展。但是“万变不离其宗”,这里的“宗”主要表现在:地图是诠释世界的杰作,是浓缩历史的经典<sup>[16]</sup>,是任何时代任何社会都不可或缺的科学工具,地图的科学价值、社会价值、权属法理价值、文化价值和军事价值是不变的;地图学是用科学抽象方法重构而非复制非线性复杂地理世界的科学,是跨越时间和空间、跨越自然和人文、跨越技术和工程的科学,地图学的科学属性、技术属性和工程属性是不变的<sup>[35,118]</sup>。

4 总 结

地图学是一门科学,它来源于社会实践、服务于社会实践。在现代,科学技术是第一生产力,创新是第一动力,地图学也如此。按照科学的动态观点,科学活动由主体要素、客体要素和工具要素等三个要素组成。主体要素指科学家,他们在现代社会中构成了多层次的、具有复杂结构的体系,在探索自然、认识自然、把握自然规律的过程中始终发挥主导作用;客体要素指科学活动的对象,由于人类认识能力的局限性,认识科学活动的对象具有阶段性和选择性;工具要素指科学活动的手段,是科学认识的实验方法和手段的综合体,在人与自然界的关系中起桥梁作用。科学活动三要素同生并存、互相依傍、相互作用,构成了科学认识活动动态发展的相互作用系统。按照这样的科学活动三要素的相互依存和相互作用的科学观,就不难理解地图学发展史的三次崛起,也就不难理解现代地图学的成就和发展了。也只有按照这样的科学观,才能回答“地图学的创新向何处去?”和“下一个辉煌在哪里?”这就是“地图辩证思维引领和人工智能推动并服务国家需求的地图学发展的新时代”。只有这样,才能“登高望远、脚踏实地”,统领理论地图学、地图制图学和地图应用学的整体化发展,把握地图学沿着高度分化和高度综合的整体化发展的大方向,克服当前存在的浮躁之风和求“全”之风,构建良好的学术生态环境,这是作为科学活动三要素中主体要素的科学家要特别注意的。

人工智能推动地图学发展进入新时代是时代之大势,这既是机遇也是挑战。当前地图学进一



步发展中的很多问题都需要利用人工智能技术,需要开展面向地图学实际问题的人工智能基础研究,需要地图学与人工智能的交叉融合,从而提高地图设计、制图数据处理、制图综合等的智能化水平和地图生产的自动化程度,从深层次讲,要特别重视人脑神经元网络组织结构与“人脑地图”生成机理及其与空间认知的关系,以及“类脑智能”、空间认知如何指导制图者设计制作地图和用图者通过地图认知非线性复杂地理世界等问题的研究。

把握地图学的高度分化与高度综合的整体化发展大方向至关重要。只有这样,才能以问题为导向、以需求为牵引,打破学科壁垒,推进地图学同其他学科的融合研究,实现地图学的高度分化与高度综合的整体化发展,更好地服务国家和国防建设需求。

## 参考文献:

- [1] 王家耀. 序[C]//地图简史. 北京: 中国社会科学文献出版社, 2020.  
WANG Jiayao. Preface[C]//Brief History of Maps. Beijing: China Social Sciences Documentation Publishing House, 2020.
- [2] 王家耀, 孙群, 王光霞, 等. 地图学原理与方法[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2014.  
WANG Jiayao, SUN Qun, WANG Guangxia, et al. Principle and method of cartography[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014.
- [3] 王家耀. 信息化时代的地图学[J]. 测绘工程, 2000, 9(2): 1-5.  
WANG Jiayao. Cartography in information ERA[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2000, 9(2): 1-5.
- [4] 王家耀, 陈毓芬. 理论地图学[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.  
WANG Jiayao, CHEN Yufen. Theoretical cartography [M]. Beijing: PLA Press, 2000.
- [5] 张萍. 西北城市变迁古旧地图集萃[M]. 西安: 西安地图出版社, 2021.  
ZHANG Ping. Collection of ancient maps of urban changes in northwest China [M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 2021.
- [6] 湖南省国土资源厅. 洞庭湖历史变迁地图集[M]. 长沙: 湖南地图出版社, 2011.  
Department of Land and Resources of Hunan Province. Atlas of historical vicissitude in Dongting Lake[M]. Changsha: Hunan Map Publishing House, 2011.
- [7] 国家地图编委会. 中华人民共和国国家历史地图集[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2012.  
National Map Editorial Committee. National historical atlas of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2012.
- [8] 《重庆历史地图集》编撰委员会. 重庆历史地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2013.  
Chongqing Historical Map Editorial Committee. The historical atlas of Chongqing [M]. Beijing: Sinomap Press, 2013.
- [9] 中国科学院地理科学与资源研究所. 中华人民共和国行政区划变迁地图集(1949—1979, 1980—2017)[Z]. 北京: 中国地图出版社, 2016, 2019.  
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS. Atlas of changes in administrative division of the People's Republic of China (1949—1979, 1980—2017)[Z]. Beijing: Sinomap Press, 2016, 2019.
- [10] 安徽省第四测绘院. 安徽省历史地图集·古旧地图卷[M]. 北京: 中国地图出版社, 2021.  
Anhui Fourth Surveying and Mapping Institute. The historical atlas of Anhui province · chapter of ancient map [M]. Beijing: Sinomap Press, 2021.
- [11] 内蒙古自治区测绘地理信息局, 内蒙古自治区测绘学会. 内蒙古历史沿革地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2018.  
Bureau of Surveying, Mapping and Geographic Information of Inner Mongolia Autonomous Region, Surveying and Mapping Society of Inner Mongolia Autonomous Region. Atlas of historical evolution of Inner Mongolia[M]. Beijing: Sinomap Press, 2018.
- [12] 席会东. 中国古代地图文化史[M]. 北京: 中国地图出版社, 2013.  
XI Huidong. Cultural history of ancient Chinese cartography[M]. Beijing: Sinomap Press, 2013.
- [13] 卢良志. 中国地图发展史[M]. 北京: 星球地图出版社, 2012.  
LU Liangzhi. History of map development in China[M]. Beijing: Planet Map Publishing House, 2012.
- [14] 约翰·布莱克. 海图发展图解史[M]. 李树军, 译. 北京: 海潮出版社, 2014.  
BLAKE J. Sea chart the illustrated history of nautical maps and navigational charts[M]. LI Shujun, trans. Beijing: Haichao Press, 2014.
- [15] 诺曼·思罗尔. 地图的文明史[M]. 陈丹阳, 张佳静, 译. 北京: 商务印书馆, 2016.  
THROWER N J W. Maps and civilization[M]. CHEN Danyang, ZHANG Jiaping, trans. Beijing: The Commercial Press, 2016.
- [16] 杰瑞·布罗顿. 伟大的世界地图[M]. 齐东峰, 译. 北京: 中国大百科全书出版社, 2017.  
BROTTON J. Great maps[M]. QI Dongfeng, trans. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2017.
- [17] 湖北省历代地图成果概览编委会. 湖北省历代地图成果概览[M]. 长沙: 湖南地图出版社, 2017.  
Editorial Committee of Collection of Hubei Maps from Ancient to Modern. A collection of Hubei maps from ancient to modern[M]. Changsha: Hunan Map Publishing House, 2017.
- [18] 成一农. 中国古代舆地图研究[M]. 北京: 中国社会科学

- 出版社, 2018.
- CHENG Yinong. Study on geographic maps in ancient China[M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2018.
- [19] 华林甫. 中华文明地图[M]. 北京: 地图出版社, 2018.
- HUA Linfu. Map of Chinese civilization[M]. Beijing: Sinomaps Press, 2018.
- [20] 李花子. 明清时期中朝边界史研究[M]. 北京: 知识产权出版社, 2011.
- LI Huazhi. On boundary history between China and Korea in Ming Dynasty and Qing Dynasty[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2011.
- [21] 陈昱, 廖克, 施曼丽. 走进地图世界[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2018.
- CHEN Yu, LIAO Ke, SHI Manli. Walking into the world of maps [M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House, 2018.
- [22] KRETSCHMER I. The pressing problems of theoretical cartography[C]//Proceedings of 1978 International Yearbook of Cartography XVIII. [S.l.]: Survey Review, 1978: 33-39.
- [23] FREITAG U. Can communication theory form the basis of a general theory of cartography? [J]. Nachrichten aus dem Karten-und Vermessungsvesen, Reihe II, 1980, 83: 17-35.
- [24] 高俊. 地图·地图制图学, 理论特征与科学结构[J]. 地图, 1986(1): 4-10.
- GAO Jun. Map, cartography: theoretical characteristics and scientific structure[J]. Map, 1986(1): 4-10.
- [25] 廖克. 试论现代地图学的体系[J]. 地理学报, 1983, 38(1): 80-89.
- LIAO Ke. On the modern cartographic system[J]. Acta Geographica Sinica, 1983, 38(1): 80-89.
- [26] KAINZ W. Cartography and the others—aspects of a complicated relationship[J]. Geo-Spatial Information Science, 2020, 23 (1): 52-60. DOI: 10.1080/10095020.2020.1718000.
- [27] 张克权, 郭仁忠. 专题制图数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1991.
- ZHANG Kequan, GUO Renzhong. Mathematical models for thematic mapping [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1991.
- [28] 祝国瑞, 徐肇忠. 普通地图制图中的数学方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1990.
- ZHU Guorui, XU Zhaozhong. Mathematical methods for making general maps [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990.
- [29] 钟业勋, 胡宝清, 董新华, 等. 地图学概念的数学表述研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHONG Yexun, HU Baoqing, TONG Xinhua, et al. Study on mathematical expressions of cartographic concepts[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [30] 钟业勋. 数理地图学[M]. 2版. 北京: 测绘出版社, 2017.
- ZHONG Yexun. Mathematical cartography[M]. 2nd ed. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2017.
- [31] 王家耀, 邹建华. 地图制图数据处理模型与方法[M]. 北京: 解放军出版社, 1990.
- WANG Jiayao, ZOU Jianhua. Models and methods for data processing in mapping [M]. Beijing: PLA Press, 1990.
- [32] 胡鹏, 游涟, 杨传勇, 等. 地图代数[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- HU Peng, YOU Lian, YANG Chuanyong, et al. Map algebra[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.
- [33] 郭方云. 文学地图学[M]. 北京: 商务印书馆, 2020.
- GUO Fangyun. Literary cartography [M]. Beijing: The Commercial Press, 2020.
- [34] 牟伶俐. 月球地图学[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- MU Lingli. Moon cartography [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [35] 王家耀. 地图集: 重构复杂非线性地理世界的“百科全书”[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(1): 1-8.
- WANG Jiayao. Atlas: The “encyclopedia” of reconstructing complex nonlinear geographical world[J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(1): 1-8.
- [36] 列宁. 列宁全集-第38卷[M]. 中共中央马克思恩格斯列宁斯大林著作编译局, 译. 北京: 人民出版社, 1986.
- LE Nin. The volume 38 of Lenin corpora[M]. Compilation Bureau of Works of Marx, Engels, Lenin and Stalin of the CPC Central Committee, trans. Beijing: People's Publishing House, 1986.
- [37] 苏珊·汉森. 改变世界的十大地理思想[M]. 肖平, 王方雄, 李平, 译. 北京: 商务印书馆, 2009.
- HANSON S. 10 geographic ideas that changed the world [M]. XIAO Ping, WANG Fangxiong, LI Ping, trans. Beijing: The Commercial Press, 2009.
- [38] 王家耀. 人工智能开启地图学的新时代[M]. 地图研究(1), 北京: 测绘出版社, 2021.
- WANG Jiayao. Artificial intelligence: launching a new era of cartography[M]. Map Research (1). Beijing: Surveying and Mapping Press, 2021.
- [39] 郭庆胜, 黄远林, 郑春燕, 等. 空间推理与渐进式地图综合[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- GUO Qingsheng, HUANG Yuanlin, ZHENG Chunyan, et al. Spatial reasoning and gradual map generalization [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007.
- [40] 武芳, 邓红艳, 钱海忠, 等. 地图自动综合质量评估模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- WU Fang, DENG Hongyan, QIAN Haizhong, et al. Quality assessment methods in automated map generalization[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [41] 闫浩文, 王家耀. 地图群(组)目标描述与自动综合[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- YAN Haowen, WANG Jiayao. Description approaches and automated generalization algorithms for groups of map objects[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [42] 王家耀, 李志林, 武芳. 数字地图综合进展[M]. 北京: 科

- 学出版社, 2011.
- WANG Jiayao, LI Zhilin, WU Fang. Advances in digital map generalization[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [43] 武芳, 巩现勇, 杜佳威. 地图制图综合回顾与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1645-1664. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170287.
- WU Fang, GONG Xianyong, DU Jiawei. Overview of the research progress in automated map generalization[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1645-1664. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170287.
- [44] 杜世宏. 多尺度空间关系理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- DU Shihong. Theory and practice of multi-scale spatial relations[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [45] 武芳, 许俊奎, 李靖涵. 居民地增量级联更新理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- WU Fang, XU Junkui, LI Jinghan. Incremental propagating updating theories and methods for settlements[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [46] 武芳, 钱海忠, 邓红艳, 等. 面向地图自动综合的空间信息智能处理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- WU Fang, QIAN Haizhong, DENG Hongyan, et al. Spatial data intelligent processing for automated map generalization[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [47] 张新长, 孙颖, 黄健峰, 等. 多尺度空间数据联动更新技术研究及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- ZHANG Xinchang, SUN Ying, HUANG Jianfeng, et al. Propagating updating techniques and applications of multi-scale spatial data[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [48] PEI Hongxing, ZHAI Renjian, WU Fang, et al. Automatic matching of multi-scale road networks under the constraints of smaller scale road meshes[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(4): 73-83. DOI: 10.11947/j. JGGS.2019.0408.
- [49] 陈述彭. 信息流与地图学[J]. 世界科学, 1993(1): 9-12.
- CHEN Shupeng. Information flow and cartography[J]. World Science, 1993(1): 9-12.
- [50] 王家耀, 武芳. 时空大数据与时空大数据平台[C]//中国地理信息产业发展报告(2019). 北京: 测绘出版社, 2019.
- WANG Jiayao, WU Fang. Spatio-temporal big data and spatio-temporal big data platform[C]// Proceedings of 2019 China Geospatial Information Industry Report. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2019.
- [51] 郭达志, 杨维平, 韩国建. 矿山地理信息系统中的空间和时间四维数据模型[J]. 测绘学报, 1993, 22(1): 33-40.
- GUO Dazhi, YANG Weiping, HAN Guojian. A spatial and temporal 4D data model for mine GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1993, 22(1): 33-40.
- [52] 龚健雅. 规范化空间对象模型与实现技术[J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 309-314.
- GONG Jianya. Formal spatial object model and its implementation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1996, 25(4): 309-314.
- [53] 龚健雅. GIS中面向对象时空数据模型[J]. 测绘学报, 1997, 26(4): 289-298.
- GONG Jianya. An object-oriented spatio-temporal data model in GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 25(4): 289-298.
- [54] 黄明智, 张祖勋. 时空数据模型的N1NF关系基础[J]. 测绘学报, 1997, 26(1): 1-6.
- HUANG Mingzhi, ZHANG Zuxun. N1NF relational basis of spatiotemporal data model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 26(1): 1-6.
- [55] 李清泉, 李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 325-330.
- LI Qingquan, LI Deren. Research on the conceptual frame of the integration of 3D spatial data model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(4): 325-330.
- [56] 陈军, 郭薇. 基于剖分的三维拓扑ER模型研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 308-317.
- CHEN Jun, GUO Wei. A 3D topological ER model based on space partitioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(4): 308-317.
- [57] 边馥蓉, 傅仲良, 胡自锋. 面向目标的栅格矢量一体化三维数据模型[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 294-298.
- BIAN Fuling, FU Zhongliang, HU Zifeng. An object-oriented integrative 3D data model[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(4): 294-298.
- [58] 孙敏, 薛勇, 马蔼乃, 等. 基于四面体格网的3维复杂地质体重构[J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 361-365.
- SUN Min, XUE Yong, MA Ainai, et al. Reconstruction of 3D complex geological bodies based on tetrahedron mesh[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(4): 361-365.
- [59] 尹章才, 李霖, 艾自兴. 基于图论的时空数据模型研究[J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 168-172.
- YIN Zhangcai, LI Lin, AI Zixing. A study of spatio-temporal data model based on graph theory[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(2): 168-172.
- [60] 陈军, 李志林, 蒋捷, 等. 多维动态GIS空间数据模型与方法的研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(10): 858-862.
- CHEN Jun, LI Zhilin, JIANG Jie, et al. Dynamic and multi-dimensional spatial data modeling: models and methods[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(10): 858-862.
- [61] 林广发, 冯学智, 王雷, 等. 以事件为核心的面向对象时空数据模型[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 71-76.
- LIN Guangfa, FENG Xuezhi, WANG Lei, et al. An event-centric object oriented spatio-temporal data model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(1): 71-76.
- [62] 陈占龙, 吴信才, 谢忠, 等. 分布式空间数据索引机制研究[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(10): 54-57.



- CHEN Zhanlong, WU Xincan, XIE Zhong, et al. Study of distributed index mechanism of geospatial data[J]. Micro-electronics & Computer, 2007, 24(10): 54-57.
- [63] 史文中, 郭薇, 彭奕彰. 一种面向地理信息系统的空间索引方法[J]. 测绘学报, 2001, 30(2): 156-161.
- SHI Wenzhong, GUO Wei, PENG Yizhang. A spatial indexing method for GIS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(2): 156-161.
- [64] 谈国新. 一体化空间数据结构及其索引机制研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 293-299.
- TAN Guoxin. Study of integrated spatial data structure and spatial index mechanism[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998, 27(4): 293-299.
- [65] 郑玉明, 廖湖声, 陈镇虎. 空间数据库引擎的 R 树索引[J]. 计算机工程, 2004, 30(5): 38-39, 97.
- ZHENG Yuming, LIAO Husheng, CHEN Zhenhu. R-tree index in a spatial database engine[J]. Computer Engineering, 2004, 30(5): 38-39, 97.
- [66] 左小清, 李清泉. 一种面向道路网 3 维数据的空间索引方法[J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 57-63.
- ZUO Xiaoqing, LI Qingquan. A spatial indexing approach on road network data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(1): 57-63.
- [67] 鞠时光. 可视化空间数据库查询语言 CQL[J]. 计算机学报, 1999, 22(2): 205-211.
- JU Shiguang. Visual query language CQL for spatial database[J]. Chinese Journal of Computers, 1999, 22(2): 205-211.
- [68] 马林兵, 龚健雅. 面向自然语言的空间数据库查询研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(22): 16-19.
- MA Linbing, GONG Jianya. Research on spatial database query oriented natural language[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(22): 16-19.
- [69] 夏宇, 朱欣焰, 周春辉. 基于特征的空间数据相似性查询研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(25): 15-17, 47.
- XIA Yu, ZHU Xinyan, ZHOU Chunhui. Research on feature based spatial data similarity query[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(25): 15-17, 47.
- [70] 黄波, 徐冠华, 阎守邕. 基于扩展关系模型的整体空间数据管理[J]. 遥感学报, 1997, 1(1): 69-73.
- HUANG Bo, XU Guanhua, YAN Shouyong. The full integrated spatial data management based on extended relational data model[J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(1): 69-73.
- [71] 蒋景瞳. 国家基础地理信息系统全国 1:25 万数据库设计和应用研究[J]. 遥感信息, 1999(4): 14-18.
- JIANG Jingtong. On design and applications of the national database at scale 1:250 000 in the national fundamental geographic system[J]. Remote Sensing Information, 1999(4): 14-18.
- [72] 邹逸江. 客户机/服务器结构的地图数据库系统设计[J]. 测绘学报, 1999, 28(3): 251-256.
- ZOU Yijiang. The map database system design based on client/server structure [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(3): 251-256.
- [73] 王东华, 刘建军, 商瑶玲, 等. 全国 1:25 万数字高程模型数据库的设计与建库[J]. 测绘通报, 2001(10): 27-28.
- WANG Donghua, LIU Jianjun, SHANG Yaoling, et al. The design and establishment of 1:250 000 digital elevation model of China [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2001(10): 27-28.
- [74] 李琦, 常磊, 王凌云. 面向数字城市的空间数据库设计与实现[J]. 计算机科学, 2004, 31(3): 89-91, 105.
- LI Qi, CHANG Lei, WANG Lingyun. The design and implementation of spatial database for digital city[J]. Computer Science, 2004, 31(3): 89-91, 105.
- [75] 蒋捷, 陈军. 基础地理信息数据库更新的若干思考[J]. 测绘通报, 2000(5): 1-3.
- JIANG Jie, CHEN Jun. Some consideration for update of fundamental geo-information database[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000(5): 1-3.
- [76] 王东华. 国家 1:50 000 基础地理数据库建库的技术研究与实践[J]. 地理信息世界, 2006, 4(4): 4-5.
- WANG Donghua. Research and implementation of construction of 1:50 000 scale topographic database in China [J]. Geomatics World, 2006, 4(4): 4-5.
- [77] 王友升. 城市三维地质空间数据库建库设计方案[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(5): 1176-1178.
- WANG Yousheng. Design of spatial database for urban three-dimensional geology[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(5): 1176-1178.
- [78] 刘影, 李洋, 刘仍奎. 铁路空间数据库的构建[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(2): 96-99.
- LIU Ying, LI Yang, LIU Rengkui. Construction of spatial database for railway[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(2): 96-99.
- [79] 宋海朝, 杨钰, 周俭. 分布式空间数据库的研究与设计[J]. 计算机工程与设计, 2004, 25(11): 2046-2048.
- SONG Haichao, YANG Yu, ZHOU Jian. Research and design of distributed spatial database[J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(11): 2046-2048.
- [80] 池天河, 齐清文, 廖克, 等. 国家自然地图数据库的建设及其信息产品开发[J]. 地理学报, 2002, 57(Z1): 18-26.
- CHI Tianhe, QI Qingwen, LIAO Ke, et al. Development of the national physical atlas database and its information products[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(Z1): 18-26.
- [81] 龚健雅, 朱欣焰, 朱庆, 等. 面向对象集成化空间数据库管理系统的设计与实现[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(4): 289-293.
- GONG Jianya, ZHU Xinyan, ZHU Qing, et al. Design and implementation of object-oriented integrated spatial database management system[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 2000, 25(4): 289-293.
- [82] 李振胜, 鞠时光. 安全空间数据库动态审计策略的研究与

- 应用[J]. 计算机应用, 2006, 26(11): 2678-2681, 2684.
- LI Zhengsheng, JU Shiguang. Research and application of dynamic audit policy for secure spatial database [J]. Journal of Computer Applications, 2006, 26(11): 2678-2681, 2684.
- [83] 涂志勇, 郭仁忠, 李霖, 等. 空间数据库目标聚合功能的探讨[J]. 测绘通报, 2000(2): 13-14, 17.
- TU Zhiyong, GUO Renzhong, LI Lin, et al. A research on object condensation function for spatial database[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000(2): 13-14, 17.
- [84] 马照亭, 潘懋, 林晨, 等. 多源空间数据的共享与集成模式研究[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(24): 31-34.
- MA Zhaoting, PAN Mao, LIN Chen, et al. Research of sharing and integration mode for multi-source spatial data [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(24): 31-34.
- [85] 易善桢, 李琦, 承继成. 空间信息的共享与互操作[J]. 测绘通报, 2000(8): 17-19.
- YI Shanzhen, LI Qi, CHENG Jicheng. Sharing and interoperability of spatial information[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000(8): 17-19.
- [86] 李新, 黄春林. 数据同化: 一种集成多源地理空间数据的新思路[J]. 科技导报, 2004(12): 13-16.
- LI Xin, HUANG Chunlin. Data assimilation: a new means for multi-source geospatial data integration[J]. Science & Technology Review, 2004(12): 13-16.
- [87] 刘占伟, 刘厚泉. 基于 GML 的多源异构空间数据集成系统的设计[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(8): 1962-1965.
- LIU Zhanwei, LIU Houquan. Design of system of multi-source heterogeneous spatial data integration based on GML[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(8): 1962-1965.
- [88] 余江峰, 冯学智, 林广发, 等. 多尺度时空数据的集成与对象进化模型[J]. 测绘学报, 2005, 34(1): 71-77.
- SHE Jiangfeng, FENG Xuezhi, LIN Guangfa, et al. The integration of multi-scale spatiotemporal data and the object evolution model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(1): 71-77.
- [89] 宋关福, 钟耳顺, 刘纪远, 等. 多源空间数据无缝集成研究[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2): 110-115.
- SONG Guanfu, ZHONG Ershun, LIU Jiyuan, et al. A study on seamless integration of multi-sources spatial-data (SIMS) [J]. Progress in Geography, 2000, 19(2): 110-115.
- [90] 唐桂芬, 廖巍, 陈苹, 等. 面向地理数据服务的空间数据集成关键技术研究[J]. 计算机科学, 2007, 34(9): 99-102.
- TANG Guifen, LIAO Wei, CHEN Luo, et al. Research on key technologies of geo-data services-oriented spatial data integration[J]. Computer Science, 2007, 34(9): 99-102.
- [91] 吴孟泉, 宋晓东, 崔伟宏. 基于本体的异构空间数据的集成研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(10): 915-918.
- WU Mengquan, SONG Xiaodong, CUI Weihong. On ontology-driven heterogeneous geographic data set integration[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(10): 915-918.
- [92] 崔铁军, 郭黎. 多源地理空间矢量数据集成与融合方法探讨[J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(1): 1-4.
- CUI Tiejun, GUO Li. The study for multisource geospatial vector data integration and fusion[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2007, 24(1): 1-4.
- [93] 李德仁, 程涛. 从 GIS 数据库中发现知识[J]. 测绘学报, 1995, 24(1): 37-44.
- LI Deren, CHENG Tao. Knowledge discovery from GIS databases[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1995, 24(1): 37-44.
- [94] 邸凯昌. 空间数据发掘和知识发现的理论与方法[D]. 武汉: 武汉大学, 1999.
- DI Kaichang. The theory and methods of spatial data mining and knowledge discovery[D]. Wuhan: Wuhan University, 1999.
- [95] 李德仁, 王树良, 李德毅. 空间数据挖掘理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- LI Deren, WANG Shuliang, LI Deyi. Spatial data mining theories and applications [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [96] 吕安民. 人口空间数据挖掘及其应用方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- LÜ Anmin. Population spatial data mining and its application methods[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002.
- [97] 周海燕. 空间数据挖掘的研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2003.
- ZHOU Haiyan. Research on spatial data mining [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2003.
- [98] 王家耀. 时空大数据时代的地图学[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1226-1237. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170308.
- WANG Jiayao. Cartography in the age of spatio-temporal big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1226-1237. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170308.
- [99] 王家耀, 陈科, 成毅. 地图哲学——哲学视野下的地图演化[J]. 地图, 2017(1): 28-39.
- WANG Jiayao, CHEN Ke, CHENG Yi. Map philosophy—map evolution from the perspective of philosophy[J]. Map, 2017(1): 28-39.
- [100] 集智俱乐部. 科学的极致: 漫谈人工智能[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- Swarm Club. The extreme of science, talking about artificial intelligence [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [101] 涂元季. 钱学森书信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- TU Yuanji. Letters by Qian Xuesen [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

- [102] 李娜. 被批 20 年无进展, 人工智能需要重启[J]. 科技导报, 2011, 29(14): 9.  
LI Na. Should AI be restart? [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(14): 9.
- [103] 李德毅, 杜鹄. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
LI Deyi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [104] 何海威, 钱海忠, 谢丽敏, 等. 立交桥识别的 CNN 卷积神经网络法[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 385-395. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170265.  
HE Haiwei, QIAN Haizhong, XIE Limin, et al. Interchange recognition method based on CNN[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(3): 385-395. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170265.
- [105] 谢丽敏, 钱海忠, 何海威, 等. 基于案例推理的居民地选取方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11): 1910-1918. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170061.  
XIE Limin, QIAN Haizhong, HE Haiwei, et al. A habitation selection method by using case-based reasoning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(11): 1910-1918. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170061.
- [106] YAN Xiongfeng, AI Tinghua, YANG Min, et al. A graph convolutional neural network for classification of building patterns using spatial vector data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 150: 259-273.
- [107] YAN Xiongfeng, AI Tinghua, YANG Min, et al. Graph convolutional autoencoder model for the shape coding and cognition of buildings in maps[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2021, 35(3): 490-512.
- [108] YANG Min, YUAN Tuo, YAN Xiongfeng, et al. A hybrid approach to building simplification with an evaluator from a backpropagation neural network[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2022, 36(2): 280-309.
- [109] DU Jiawei, WU Fang, XING Ruixing, et al. Segmentation and sampling method for complex polyline generalization based on a generative adversarial network[J/OL]. 2021-02-09. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2021.1878288>.
- [110] 艾廷华. 深度学习赋能地图制图的若干思考[J]. 测绘学报, 2021, 50(9): 1170-1182. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210091.  
AI Tinghua. Some thoughts on deep learning enabling cartography[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(9): 1170-1182. DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20210091.
- [111] 菲儿·西蒙. 大数据可视化: 重构智慧社会[M]. 漆晨曦, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2015.  
SIMON P. The visual organization: data visualization, big data, and the quest for better decisions[M]. QI Chenxi, trans. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [112] 邱南森. 数据之美: 一本书学会可视化设计[M]. 张仲, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.  
YAU Nathan. Data points: visualization that means something[M]. ZHANG Shen, trans. Beijing: China Renmin University Press, 2014.
- [113] 朝乐门. 数据科学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.  
CHAO Lemen. Data science[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [114] 姜璐. 钱学森论系统科学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
JIANG Lu. Qian Xuesen on system science[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [115] 钱学森. 论系统工程(新世纪版)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.  
QIAN Xuesen. On system engineering of new century edition[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019.
- [116] 张梦然. 史上最强三维“人脑地图”问世——包含一亿多个突触、数万个神经元[N]. 科技日报, 2021-06-04(4).  
ZHANG Mengran. Birth of the strongest 3D “human brain maps” in history—containing more than 1 billion synapses and tens of thousands of nerve cells[N]. Science and Technology Daily, 2021-06-04(4).
- [117] 杨仓, 过国忠, 陈曦. 让学科交叉融合更好服务国家需求——部分高校负责人谈跨学科研究探索与实践[N]. 科技日报, 2021-06-02(1).  
YANG Cang, GUO Guozhong, CHEN Xi. Let specialties intercross and fuse—discussions of interdisciplinary exploration and practice by some principals of colleges and universities[N]. Science and Technology Daily, 2021-06-02(1).
- [118] 王家耀, 成毅. 论地图学的属性和地图的价值[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 237-241. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140406.  
WANG Jiayao, CHENG Yi. Discussions on the attributes of cartography and the value of map[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 237-241. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140406.

(责任编辑: 张燕燕)

收稿日期: 2021-12-01

修回日期: 2022-01-02

第一作者简介: 王家耀(1936—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为地图学与地理信息系统。

First author: WANG Jiayao (1936—), male, professor, academician of Chinese Academy of Engineering, majors in cartography and geographic information system.

E-mail: wrongpu@163.com