

引用格式:秦承志.数字地形分析方法研究的维度——精准、高效、易用[J].地球信息科学学报,2020,22(4):720-730. [Qin C Z. Dimensions of methodologic researches on digital terrain analysis: Accurate, efficient, and easy-to-use[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(4):720-730.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.200002

数字地形分析方法研究的维度——精准、高效、易用

秦承志^{1,2,3}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023

Dimensions of Methodologic Researches on Digital Terrain Analysis: Accurate, Efficient, and Easy-to-use

QIN Chengzhi^{1,2,3*}

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Digital Terrain Analysis (DTA), which can derives all kinds of topographic information widely used in diverse terrain-related geographic modeling and simulation, has been one of basic components of geo-spatial analysis, as well as one of fundamental functionalities of GIS. Researches on DTA methods have been continuously conducted in both width and depth. This paper tries to summarize the DTA researches from a new perspective, i.e., the dimensions of methodologic research on DTA. Three dimensions which successively emerged in methodologic researches on DTA are discussed, i.e., accurate, efficient, and easy-to-use. The dimension of "accurate" is of those researches on how to make DTA results more accurate. The dimension of "efficient" is of those researches on how to make DTA execution more efficient, or faster. And the new-emerging dimension of "easy-to-use" is on how to make DTA more easy-to-use in real applications as well as for users (especially those non-experts of DTA). The key study issue to be settled in the dimension of "easy-to-use" is how to formalize the knowledge on building DTA workflow properly and use it to conduct DTA during diverse real applications in an intelligent way. The proposed summarization on the dimensions of methodologic researches on DTA, as well as the corresponding methodologic researches, should be transferable for other domains in geo-spatial analysis, which often face the study issues similar to those in DTA domain.

Key words: digital terrain analysis; topographic information; parallel computation; intelligent modeling; application-context knowledge

*Corresponding author: QIN Chengzhi, E-mail: qincz@lreis.ac.cn

收稿日期:2019-12-31;修回日期:2020-01-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(41422109,41431177)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41422109, 41431177.]

作者简介:秦承志(1977—),男,山东蒙阴人,研究员,主要研究方向为数字地形分析、地理建模智能化、流域模拟与情景分析。E-mail: qincz@lreis.ac.cn

摘要:数字地形分析基于数字高程模型计算各种地形信息,在诸多地理现象和地理过程的定量刻画和模拟中都发挥着不可或缺的重要作用。作为地理信息空间分析的一个基本组成内容、GIS的必备功能之一,数字地形分析的方法研究不断深化、扩展。本文从一个新的视角,即方法研究的维度,对该领域已有工作及发展趋势进行梳理,将数字地形分析方法研究工作归纳为依次显现出的3个研究维度:①精准,即如何设计新的数字地形分析方法以更准确、精确地计算出符合地理学认知、满足应用领域问题求解所需的地形信息;②高效,即如何使数字地形分析的计算更高效;③易用,即如何使数字地形分析对于应用者(尤其是相关应用领域中非数字地形分析专家的用户)更易用。特别是近年新显现出的“易用”研究维度,通过研究设计数字地形分析领域应用建模知识的形式化表达及相应的推理应用方法,有望实现数字地形分析应用工作流的智能化构建,满足实际应用中对于数字地形分析的易用性需求;同时,其研究思路和方法也可为地理信息空间分析中诸多其他分支领域解决所面临的类似问题提供借鉴。

关键词:数字地形分析;地形信息;并行计算;智能化建模;应用场景知识

1 引言

地形既是地质过程与水、土、气、生等各地理要素综合作用的产物,也同时对于地表物质能量的分布和运移起着关键性的作用,因此,地形信息在诸多地理现象和地理过程的定量刻画和模拟中都必不可少。

自地图学发轫,表达地形就是地图的基本功能之一,表达地形内容的不同类型地图以清晰、直观呈现方式供使用者了解研究区的自然地理环境,是地理学者分析和理解地理现象和过程的一个支撑工具。陈述彭先生1954年发表出版的《中国地形鸟瞰图集》^[1-2](图1)即为典范之一,陈先生在未有遥感卫星之前,凭借地理学家的思维、地图学家的技巧,构思把透视点放在外层空间的高度上手绘了东半球三维地形,1998年美国地理学会为此向他颁发了奥·米纳地图学金奖(O.M. Miller Cartographic Medal)。

随着地基、航空航天等地形测高技术 and 数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的不断发展,DEM数据(尤其是采用栅格数据结构的DEM)的空间分辨率、数据精度、空间覆盖性、现势性、可获得性均不断提高^[3-6],伴随着GIS定量分析方法及

技术的发展,DEM以及由其派生计算得到的各种地形信息为诸多地理模型应用(如数字土壤制图、滑坡危险性评价、生境适宜度制图、流域模拟和情景分析等)提供了不可或缺的输入数据^[7-9]。这些输入数据可能是地理建模所需的地形要素空间参数(如坡度、曲率、地形湿度指数等),也可能是为其提供以地形为基础的空间对象划分(如子流域、坡面单元等)。

利用计算机等现代计算设备由DEM计算得到所需各种地形信息的过程就是数字地形分析(Digital Terrain Analysis, DTA)。这些地形信息可分为2大类:地形属性、地形特征。地形属性(Topographic attribute)关注于定量表达地形的某种连续场信息,现多以栅格数据结构进行表达和后续应用^[10],如坡度、坡向、曲率、单位汇水面积、地形湿度指数等;地形特征(Terrain feature)则关注于对地形特征对象的分类、识别^[11],常适合以点、线、多边形的形式表达^[10],如鞍点、山脊/沟谷线、子流域等。两大类型之间的分野并不绝对,常可互相转换。例如,对单位汇水面积的栅格数据施以一个阈值,是DTA中常见的提取沟谷线的方法,是一个由地形属性转换为地形特征的例子;对一个研究区的河网施以一个滑



图1 陈述彭先生所作《中国地形鸟瞰图集》(中华书局1954年出版)

Fig. 1 Prof. CHEN Shupeng's "Atlas of Bird's-Eye View on China Terrain" published by Zhonghua Book Company in 1954

动窗口平均处理后可得到河网密度分布图,是一个由地形特征转换为地形属性的例子。需要指出,广义的数字地形分析还包括DEM的生成、地形信息在相关应用领域中的应用等更多的内容^[9,12-13],作者视其为数字地形分析的上游、下游,本文主要关注于狭义的数字地形分析,即由DEM计算得到各种地形信息的过程。

数字地形分析自GIS诞生之初就一直是其地理信息空间分析(或称地理计算)的一个基本组成内容、GIS的必备功能^[10,14-15],DTA研究学者以地理信息空间分析研究群体中数量上的小众(如两年一度的数字地形分析国际会议 Geomorphometry 于2018年在美国 Boulder 召开时,注册参会人员50余人),一直开展着十分活跃的研究工作。例如,GIS领域的旗舰期刊《IJGIS》在2013年全年发表的134篇文章中,不但有1期DTA专刊(包含12篇文章)^[16],还有同年其他期中陆续发表的10篇DTA研究文章。至今,学界已根据定量刻画地形的不同角度、不同设计思路、不同应用目的等因素,设计出各式各样的地形信息,并相应发展出大量的DTA方法^[7,17]。这些地形信息和相应方法不但直接支持着诸多地理模型应用,也为地理信息空间分析的其他分支领域提供着方法设计思路。例如,《IJGIS》近3年的10篇最高引文章中(根据2019年12月27日IJGIS期刊网站上发布的信息),除1篇是DTA研究文章外^[18],还有2篇是数字地形分析学者将本领域方法设计思路推广到空间分析其他领域的研究方法中^[19-20]。

对数字地形分析领域的研究工作已有很多综述性的梳理,这些综述工作通常或侧重于从地形信息不同分类的角度梳理地形信息及其算法^[7,17],或以理论研究、方法研究、应用研究来区分^[21],或是侧重于从不同应用领域角度进行梳理^[22-23]。但是,“横看成岭侧成峰”,本文意在从另一个视角,即方法研究的不同维度,来阐述作者在近些年对数字地形分析方法研究的过程中逐渐形成的对该领域已有工作及发展趋势的一些认识和想法,呈上供同行学者批评指正。

2 第一维度——精准

数字地形分析方法研究的首要维度就是“精准”(图2),即如何设计新的DTA方法以更准确、精

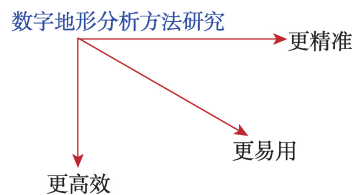


图2 数字地形分析方法研究的3个维度
Fig. 2 Three dimensions of methodologic research on digital terrain analysis

确地计算出符合地理学认知^[24]、满足应用领域问题求解所需的地形信息。在这个维度上的DTA方法研究可进一步分为3类:对已有地形信息设计新算法;设计新型的地形信息;设计新的DTA评价方法。

2.1 对已有地形信息设计新算法

当一种地形信息被提出后,对其最初的算法不断改进、提高准确性和精度,这是DTA乃至空间分析方法研究的基本内容。典型的例子如坡度和曲率的算法改进^[25-26]、以及对计算单位汇水面积的流向算法的改进^[17]。

对一种已有地形信息改进原有算法、设计新算法的研究思路通常是在发现原有算法在某些场合不适用(如计算结果偏离参考值较大,即精度不够,或结果明显不符合地理学认知,即不准确、不合理)时,在地理学及其分支学科(如地貌、水文、土壤等)知识的引导下设计该地形信息的新算法,以改善计算结果的质量。例如,秦承志等^[27]分析发现,虽然多流向算法已被此前许多研究证明了在常见应用场景下(如研究区地形较为平缓,DEM分辨率较高,关注于坡面上单位汇水面积的详细空间分布或是将进一步用于派生计算地形湿度指数、水流强度指数等地形信息时)明显优于更早提出的单流向算法,但常用的多流向算法由于固定水流分配指数,会导致无论局域地形的陡缓,只要邻域内多个下坡方向间的下坡坡度比例一样,对应的下坡邻域间的水流分配比例就保持不变^[28]。这明显违背地理学知识,即局域地形越陡时,水流越倾向于汇流、从最陡下坡方向排出;当局域地形越平缓时,水流越倾向于漫散流动、在邻域各下坡方向间平均分配^[28]。据此,Qin等^[28]提出了随局域地形条件自适应的多流向算法MFD-md,经后续不同的评价对比研究表明其效果后,该算法现已被ESRI公司作为多流向算法的代表实现在ArcGIS软件(10.6版本起)的全产品线中。

2.2 设计新型地形信息

DTA可计算的地形信息各式各样。其中,坡度、坡向等地形信息在DTA出现之前即已被提出,为传统地貌学、水文学研究所使用;而许多其他的地形信息则是在DTA出现之后随着研究的深入,出于从不同角度定量刻画地形、服务于不同应用目的等方面的考虑而被提出的。

当已有的地形信息不足以满足应用需求时,新的地形信息就可能被设计出来,以期从一个新的角度定量刻画地形,服务于某些应用。一个新的地形信息可能是和已有的某种地形信息有不少重叠的(如大量不同类型的曲率之间,二者差别不大的例子并不鲜见^[26]),或是对现有若干地形信息的组合(如地形湿度指数是坡度和单位汇水面积的组合),也有可能是出于一个现有地形信息设计中缺乏考虑的新思路。近年来,这样的新型地形信息包括多尺度谷底平坦性指数(MRVBF)^[29]、地形部位的模糊分类信息^[30-33]、地形元素Geomorphons^[34-35]、坡形^[36]等。

2.3 设计新的DTA评价方法

与其他各种分析计算方法的研究过程一样,一个提取地形信息的DTA算法一经设计出,必须经过某种评价证明其有效性之后,才可能进入本领域的方法库中(其形式可以是发表学术论文、集成入算法库等)。对于已有的地形信息,其新算法的评价须通过和该地形信息的通行算法和/或截至目前被认为是其最优的算法相比较以体现新算法的优势;对于某种新型地形信息,则需通过对比与其设计目标相近或性质有所重叠的已有地形信息来体现新型地形信息的独特优势。当相同目标的某一类DTA算法积累到一定数量时,也需要通过相同标准下的横向对比评价来比较、评判不同方法的表现^[17]。因此,DTA评价方法的重要性毋庸置疑。

不同于数学公式推导结果的正误性评价,DTA算法的评价(以及地理信息空间分析中其他各分支领域的算法评价)常常是多角度、多方式的,其评价结论常常并非简单绝对化的正误,这是源于地理学的特殊性质。DTA算法的评价角度对应着算法的适用场景,主要包括研究区地理环境、数据适用性(如DEM数据来源、空间分辨率范围、对DEM误差的敏感性)、应用目的(如所得地形信息的结果适用于研究精细尺度下坡面过程或是大尺度的陆面过程)等。其中,地理环境如地形条件的陡缓,乃至于

形成地形表象背后的地理学成因机理——气候条件的干湿、地质条件的稳定性等,影响着DTA算法的适用范围。适合黄土高原地区的DTA算法并不一定适用于南方丘陵区,许多DTA算法恰恰是针对一些特殊地理环境所设计的(如提取黄土高原地形特征的DTA算法^[37-38])。数据适用性和应用目的评价角度可类推,此处不赘述。

对DTA算法的评价方式,除了最通用的定量评价方式——相对于参考值(“真值”)的偏差外,还受地理现象和地理研究的特点影响而有其地理学特殊性。注意对于地形信息而言,“真值”并非确定无疑。即便如坡度这样有明确数学定义的地形参数,按照数学定义的曲面点上切平面求取出的坡度理论值也并不等同于地形地貌学上的坡度值(后者受分析尺度约束),而后者是地理学研究更为需要的坡度信息^[39]。此外,还有许多地形信息是根据地理现象和过程在进行较大幅度简化、假设之后设计出来的(如汇水面积、地形湿度指数^[40]、坡长^[41]),其真值并非野外观测所能获得(如地形湿度指数)、甚或不存在(如坡位空间渐变信息)。此时,根据地理学知识进行的定性的DTA算法结果合理性分析就显现出与定量评价同等重要的作用^[28,35]。

综上,当关注于对DTA算法的不同评价角度和评价方式,有可能需要在传统的评价方法之外,开发新的DTA评价方法。由于地理学研究有定性分析评价的传统,面向GIS数值化、量化的本质特点,开发新的DTA定量评价方法尤为重要。例如,为评价某种地形信息的算法误差,需要尽可能地获得每一位置点(栅格)上的参考值,野外实际观测值即使可用也会因成本过高、不可全覆盖而无法做到这一点,为此,可根据地形信息的定义通过对人造地形面的数学定义进行数学推导^[26,42-44]或是数值法求解^[45]。再如,为了评价DTA算法受数据分辨率、分析尺度等的影响程度或尺度适用范围开发多尺度DTA评价方法^[46-47],以及为评价DTA算法的DEM数据误差敏感性而开发的蒙特卡罗定量模拟方法^[48-49]。一个好的DTA评价方法,不但能准确评价出被评价DTA算法的表现,还能进一步用于分析被评价算法的不足之处,以启发对被评价算法的改进。

需注意的是,一个新的DTA评价方法提出后,并不意味着其所改进的、面向同一个评价角度的已有评价方法是错误的,有可能只是新方法得到的评

价结论所适用的场景更全面或是更贴近实际应用。以用于评价不同流向算法计算单位汇水面积结果准确性的评价方法研究为例,传统基于实际研究区 DEM 对比评价不同流向算法的方法,其评价结果是混合了流向算法误差和 DEM 误差 2 个方面因素的综合产物,且由于真实地形的 DEM 上难以得到单位汇水面积真值,也导致这种传统方式只能评价不同流向算法间的相对差异,而非绝对误差。对此,Zhou 和 Liu^[42]设计了能够模拟 4 种不同地形特征的人造地形面数学公式,并推导出对应的单位汇水面积理论值,可用于定量评价流向算法误差,这种评价方式还可通过对人造面在不同 DEM 分辨率下进行采样,来评价不同流向算法受 DEM 分辨率的影响。Qin 等^[44]进一步针对 Zhou 和 Liu^[42]所设计的人造面过于简单、在实际地形中缺乏对应的不足之处,改进提出了一套实际中更为普遍存在的、凹凸变化的复合地形特征人造面,并推导出对应的单位汇水面积理论值。在同一方法论下,后两种评价方法所得的评价结果本身都是正确的,但评价中所考虑的场景在实际中出现的广泛程度有较大差别,这意味着所得到的评价结论在实际应用场景中的适用程度也相应地有较大差别。

除了上述 DTA 定量评价方法外,由于 DTA 所计算出的地形信息常常直接面向地理模型应用(某些地形信息的设计出发点即直接面向特定的研究领域,如沟沿线之于流域侵蚀及地貌发育研究^[50]),因此以实际应用评价 DTA 算法仍是重要一环(这部分是否属于狭义的 DTA 范畴,仅是狭义 DTA 和广义 DTA 对于下游应用范畴在认识上的差异,无损其重要性)。尤其对于设计出的新型地形信息,开发示范性的实际应用模型,以体现新型地形信息在应用领域中的作用和已有地形信息所不具备的优势,这是非常必要的。例如,Qin 等^[51]将刻画坡位空间渐变的模糊坡位信息实际应用于数字土壤制图领域的目的性采样点布设和推测性土壤制图,Zhu 等^[56]设计了坡形信息并应用于滑坡危险性评价。

3 第二维度——高效

随着数字地形分析方法研究沿着“精准”这一首要维度发展出大量 DTA 算法,在实际应用中日益面临着同样数据下如何能高效地执行这些算法、在

用户可容忍的时间内给出计算结果的应用需求,因此扩展出了 DTA 方法研究的第二个维度——高效(图 2)。

3.1 串行算法优化设计

在 GIS 发展的早期,执行 DTA 功能的计算平台是单机,DTA 算法也都是串行算法,提高 DTA 算法速度的主要方式是串行算法优化设计。例如,引入新的数据结构(如引入队列或栈来记录中间结果,减少遍历搜索计算量,常以提高算法内存消耗量为代价)、重新设计串行算法(如搜索次序的调整、或将递归设计改写为非递归设计等)以降低算法时间复杂度(如填注串行算法的一系列改进工作^[52-56]),结合更高效的数据存取方式以减少 I/O 时间。这些设计改进本质上是属于计算机程序设计,而非 DTA 算法设计。需提及的是,部分算法在改进某个已有 DTA 算法时,设计上修改原算法中的分析思路、简化原算法中考虑的因素或是改变输入数据,可同时提高 DTA 算法效率,这实际上是在改变原算法的设计思路和适用的范围,此时这种算法研究应归于“精准”研究维度。

单机版串行算法针对时间复杂度的改进尽管体现着计算机科学传统的编程艺术,但受单机上计算资源和数据存储空间的直接限制,随着 DEM 数据分辨率不断提高、应用范围的日益扩大、DTA 计算量的不断增长,现实应用中 DTA 所日益表现出的数据密集型和计算密集型相叠加的特点远远超出了传统单机版串行算法设计的能力范围。

计算机领域高性能计算的软硬件技术发展迅猛,为数据密集型和计算密集型的地理计算提供了当前主流的解决途径——并行计算,在“高效”维度上的 DTA 方法研究概莫能外。

3.2 对单一算法针对特定并行计算平台的并行化设计

计算机领域提供了各种各样的并行计算软硬件平台可供地理计算并行化,如个人计算机上的多核 CPU、众核的通用计算 GPU、集群机等并行计算硬件设备,以及 openMP、CUDA、MPI 等并行编程库,乃至各种并行数据库,具有各自不同的编程难度、并行效率、扩展性、运行成本等特点。这种并行计算平台的多样性对 DTA 算法设计者而言,意味着并行编程难度较串行编程难度大幅提升^[57],需考虑

并行计算所可能额外带来的并行调度、容错等问题^[58],对于现存的一个DTA算法,为使其能运行在一个特定的并行计算平台上,必须对该DTA算法针对该并行计算平台进行并行化设计、实现相应的并程序序。

最初的DTA算法并行化研究都是对单一DTA算法针对特定并行计算平台的并行化设计(如文献[59]-[61]),同一个DTA算法若需运行在另一种并行计算平台需要重新开发相应的并行算法,并行编程中的可移植性问题强烈制约着已有的大量DTA算法的并行化改造效率。

3.3 通用并行化策略设计

为降低DTA算法设计者在设计实现并行化DTA程序中的并行编程难度,使设计者能像其所熟悉的传统DTA串行算法设计过程一样关注于DTA设计本身、尽可能忽略并行编程细节,通用并行化策略设计提供了解决之道。其核心思想是计算机软件设计中的底层细节封装实现为编程库、面向程序员暴露通用的编程调用接口,使其可以用编写串行算法的方式来编写出并行算法。这种封装是针对算法中细粒度计算步骤的特点和共性来进行设计实现的。由于从细粒度计算的角度看,栅格DTA算法和地理计算领域内许多其他的栅格算法具有广泛的共性,这种共性甚至远高于栅格DTA算法和基于其他DEM数据结构(如TIN或等高线)的DTA算法间的计算共性,因此DTA算法所适用的通用并行化策略设计通常是在更高层次上开展的,即栅格地理计算通用并行化策略设计以及相应的并行编程库实现^[62-64]。为进一步解决栅格地理计算并行算法的跨平台可移植性问题,Qin等^[57]提出了兼容多种并行计算平台(Beowulf集群、SMP集群、GPU)的栅格地理计算并行算子,通过封装隐藏不同并行计算平台的复杂并行编程细节(如数据域划分、并行通讯、并行I/O),以期使算法设计者能以一种近于串行编程的方式,高效开发出能兼容多种并行计算平台的栅格地理计算并行算法^[66]。

由上述可知,通用并行化策略并不只让DTA受惠,而是对整个地理计算领域具有普遍的效果,相应地,这一设计过程也更多地依赖于计算机科学高性能计算领域的设备、方法和技术。

因此,作者认为DTA方法研究的“高效”维度,已更多地延展入计算机科学高性能计算领域,这个

方向上的研究工作已趋近于GIS领域与计算机科学高性能计算领域的研究内容分野。学科交叉促进着DTA乃至整个地理计算的快速发展,但从方法研究的角度而言则应是“术业有专攻”的,这种学科交叉将促成DTA算法设计者能日益简便地实现出并程序序、满足实际应用中的计算时间响应需求,从而可更专注于本领域特有的核心科学问题和研究内容。

4 第三维度——易用

数字地形分析在实际应用中常常表现为需要合理组合一系列不同DTA任务成为一个 workflow(或称为应用模型)之后,才能实现由DEM计算得到应用所需的一个地形信息。例如,计算地形湿度指数时,通常的工作流是先对初始DEM进行填洼、去平区的预处理^[65],再基于预处理后的DEM通过流向算法计算单位汇水面积^[27],通过坡度算法求取坡度,最后将单位汇水面积和坡度输入地形湿度指数算法后得到所需的地形湿度指数^[66]。DTA的这种应用方式与地理信息空间分析中其他分支领域的方法应用方式是类似的。

DTA应用的工作流建模特点意味着多个DTA算法需要可连接、易连接地使用,对此,GIS软件(如ArcGIS、SAGA、GRASS等)或DTA工具(如TauDEM^[67]、WhiteBox^[68]、SimDTA^[69]等)传统上主要采用工具化/模块化的实现(如GIS),或是针对特定的应用 workflow以计算机程序进行固化^[70],以便于应用。但是,前者对DTA算法的模块化实现通常将 workflow构建层面上的工作交由用户负责(即需要用户逐一指定运行DTA算法级的模块);后者通常受限于特定的应用。此外,不同工具间的DTA算法模块常常不易联用。这些都导致DTA workflow构建过程易用化程度不足。

为了使DTA对于应用者(尤其是非DTA专家的相关应用领域用户)更加易用,DTA方法研究的第三个维度——易用,正日益显现出重要性(图2)。在这个维度上的研究工作可进一步分为3类:可视化建模、网络化服务、智能化建模。类似于前述“高效”维度中的情况,三者均高度依赖于计算机科学和信息科学中分支领域(如可视化、网络服务、云计算、人工智能等)的方法和技术成果,这源自于GIS先天的计算机科学与技术基因。相对而言,前二者更

多地是直接套用整个地理计算领域目前对可视化建模、网络化服务的通用设计,主要仍是工程性实现而非方法研究上针对DTA领域的深化,因此以下仅做简述;而在智能化建模方面,研究问题具有较显著的领域特殊性;同时,在整个地理计算领域中对该方法的研究都还十分薄弱,近年在DTA领域对此开始出现一些针对性的研究,因此下文重点讨论。

4.1 可视化建模

可视化建模通过将地理建模要素(数据、计算任务、算法、参数、输入-输出关系等)映射为不同的图标,随着模型的构建状态(如计算任务是否已经对应设定了算法、所需输入数据是否已具备等)或执行状态(如运行到 workflow 中哪一个计算任务)更改对应图标的可视化属性来提高 workflow 与用户间的直观性、交互性。GIS 领域中对此的一个典型例子是 ArcGIS 中的 ModelBuilder 工具,可支持用户拖拽算法模块对应的图标,以可视化的形式搭建 workflow。

4.2 网络化服务

网络化服务则是充分利用网络架构和技术(如 B/S 架构、云计算等),以使得地理计算对于用户易于获得。这主要是得益于当前地理计算网络化的 3 个方面进展:① 面向地理空间分析计算的功能强大的网络基础设施(Geospatial Cyberinfrastructure)^[71-73]及

汇总各种在线资源的门户(Portal)入口^[74-75]不断建成;② 许多地理模型和算法已被发布为网络服务形式(Geo-spatial Web Services)^[76-78]可供在线调用、组合为 workflow;③ 公开的地学数据集(尤其是 DEM 数据)也不断被发布为网络服务^[79-80]。此外,将地理计算的各种功能实现为网络化服务也便于实现跨领域的多方协同建模^[81-82]。总而言之,地理计算的网络化服务化已日趋成为主流^[83]。

4.3 智能化建模

如上所述,DTA 的实际应用过程是一个典型的地理计算 workflow 构建过程,这一建模过程中对于领域建模知识有很高的要求。如图 3 所示,若某个水文专业的研究生希望运行 TOPMODEL 水文模型,则必须准备该模型的核心输入数据,即地形湿度指数(TWI)^[40],为此他便是一个 DTA 用户,需要建立 DTA 应用模型完成从栅格 DEM 计算 TWI。该建模过程中需用到 2 大类 DTA 建模知识来指导搭建出适用的 workflow^[84-85]:① 任务和算法知识,用于回答“需要哪些 DTA 计算任务”、“如何组织为可运行的 workflow”等问题;② 使用 DTA“应用场景知识”,逐一为每一个 DTA 计算任务回答一系列关键问题,即“选取哪个具体算法”、“算法参数值如何设置”、更重要的是“选取的算法和设置的参数是否适合实际的应用场景(如应用目标、分辨率、研究区特点等)”。这

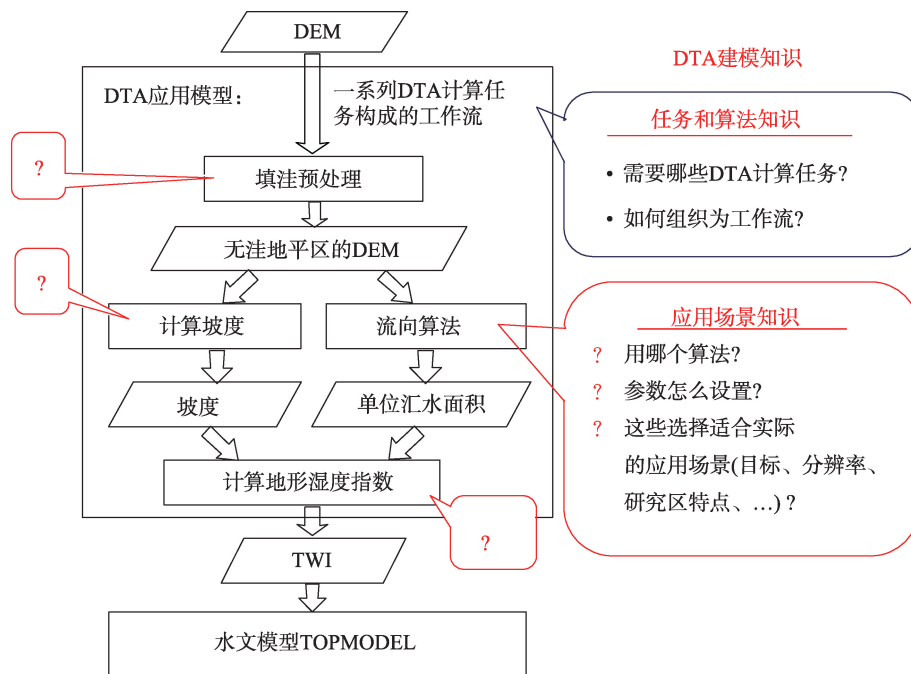


图3 数字地形分析建模知识示意

Fig. 3 Schematic diagram of DTA workflow-building knowledge

些问题的答案直接决定了所建立的DTA工作流不但是可运行的、更应是正确合理的。

面对这种高度的DTA领域建模知识需求,实际应用中的大多数DTA用户尚不具备(如上述例子中相关应用领域、非DTA专家的用户)、甚至受限于精力和陡峭的学习曲线而难以具备(如实际应用部门中的流域管理决策者,乃至利益相关的公众),因此迫切需要DTA工具能够智能化地满足用户这方面的易用性需求。而当前虽已有通用GIS软件或DTA工具能利用DTA的任务和算法知识(通常已记录为元数据形式)实现可视化建模,但仍要求用户具备DTA应用场景知识、自行保证所建DTA工作流的合理性。现有DTA应用建模的易用性还远未达到,其他地理建模领域也常面临类似的问题。

上述现状的原因主要源于DTA领域应用场景知识多为非系统化、经验性的知识,难于形式化,这些知识常常隐性地存在于应用案例文档和专家头脑中。为此,作者近年提出了DTA应用场景知识的重要性并开始了DTA智能化建模方法的探索^[85],其针对的核心科学问题是如何对DTA应用场景知识进行形式化表达并应用于自动建模,以降低用户实际应用DTA的难度。对此,初步提出了基于案例的DTA应用场景知识形式化表达与推理应用方法^[84-85]。国际数字地形分析领域的专家John Wilson教授在其新出版的DTA专著《Environmental Applications of Digital Terrain Modeling》(Wiley-Blackwell出版社,2018)中,在最后一章中列举“未来需求和机遇”时,将如何有效利用DTA应用建模知识支撑智能化建模作为首要一条加以论述^[86]。

5 结语

本文从方法研究维度的视角梳理数字地形分析领域的研究工作及发展趋势,并阐述了作者近些年在开展DTA方法研究的过程中逐渐形成的一些想法。归纳出的DTA方法研究的3个维度(精准、高效、易用),其次序既是按发展起步为序,也是实际应用深度、广度的需求驱动的结果。相对而言,目前在“易用”维度上的DTA智能化建模研究工作是最新近起步、也是最为初步的。随着数字地形分析方法研究在这3个维度上的推进、深化,并做工具化集成实现,可望最终解决DTA领域研究成果通向广泛实际应用的“最后一公里”问题。

本文侧重于DTA方法研究的维度及其发展趋势,并不侧重于具体的DTA方法及其应用。后者例如利用已有的评价方法确定出一个DTA算法的适用范围、或是同一种地形信息不同算法的横向对比结论,这些结论对于DTA领域无疑是重要的,但并非本文关注之处。相应地,本文中对于示例文献的引用也是以准确、熟悉为原则,并不以无遗漏地完整列举具体的重要DTA算法为要,特此说明。

对其他地理信息空间分析的方法研究而言,作者以为数字地形分析的方法研究维度在宏观上具有相当的代表性、通用性。尤其是在“易用”维度上探索的DTA智能化建模的思路和方法,可为地理信息空间分析中诸多其他分支领域解决所面临的类似问题提供借鉴。

参考文献(References):

- [1] 陈述彭. 中国地形鸟瞰图集[M]. 北京: 中华书局, 1954. [Chen S. Bird's-eye view atlas of terrain in China[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 1954.]
- [2] 陈述彭. 中国地形鸟瞰图集的编制工作[J]. 地理学报, 1955,21(1):71-86. [Chen S. Compiling of "bird's-eye view atlas of terrain in China"[J]. Acta Geographica Sinica, 1955,21(1):71-86.]
- [3] Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007,45(11):3317-3341.
- [4] Robinson N, Regetz J, Guralnick R P. Earth Env-DEM 90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90 m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014,87:57-67.
- [5] Yamazaki D, Ikeshima D, Tawatari R, et al. A high-accuracy map of global terrain elevations[J]. Geophysical Research Letters, 2017,44:5844-5853.
- [6] Yue L, Shen H, Zhang L, et al. High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017,123:20-34.
- [7] Wilson J P, Gallant J C, eds. Terrain analysis: Principles and applications[M]. New York: Wiley, 2000.
- [8] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [Zhou Q M, Liu X J. Digital terrain analysis[M]. Beijing: Science Press, 2006.]
- [9] Hengl T, Reuter H I, et al. Geomorphometry: Concepts, software, applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [10] 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科

- 学出版社,1999. [Chen S, Lu X, Zhou C. Introduction to geographical information system[M]. Beijing: Science Press, 1999.]
- [11] 王彦文,秦承志.地貌形态类型的自动分类方法综述[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(4):16-21. [Wang Y, Qin C. Review of methods for landform automatic classification[J]. Geography and Geo-information Science, 2017,33(4):16-21.]
- [12] 汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1305-1325. [Tang G. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(9):1305-1325.]
- [13] Lv G, Xiong L, Chen M, et al. Chinese progress in geomorphometry[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(11):1389-1412.
- [14] Maguire D J, Goodchild M F, Rhind D W, et al. Geographic information system: Principles and applications[M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.
- [15] Longley P A, Goodchild M F, Maguire D W, et al. Geographical information systems: Principles, techniques, management and applications (two volumes) [M]. New York: Wiley, 1999.
- [16] Zhou Q, Zhu A X. The recent advancement in digital terrain analysis and modeling[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013,27(7):1269-1271.
- [17] Wilson J P. Digital terrain modeling[J]. Geomorphology, 2012,137:107-121.
- [18] Reuter H I, Nelson A, Jarvis A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2007,21(9): 983-1008.
- [19] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1995,9(4):385-403.
- [20] Drăgut L, Tiede L, Levick S R. ESP: A tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010,24(6):859-871.
- [21] 杨昕,汤国安,刘学军,等.数字地形分析的理论、方法与应用[J]. 地理学报,2009,64(9):1058-1070. [Yang X, Tang G, Liu X, et al. Digital terrain analysis: Theory, method and application[J]. Acta Geographica Sinica,2009,64(9): 1058-1070.]
- [22] Moore I D, Grayson R B, Ladson A R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications[J]. Hydrological Processes, 1991,5:3-30.
- [23] 汤国安,那嘉明,程维明.我国区域地貌数字地形分析研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1570-1591. [Tang G, Na J, Cheng W. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017,46(10):1570-1591.]
- [24] 汤国安.面向地貌学本源的数字地形分析[C]. 2019年中国地理学大会,2019年11月1-3日,北京. [Tang G. Digital terrain analysis oriented to the origin of Geomorphology[C]. Conference of the Geographical Society of China, Nov. 1-3, 2019, Beijing.]
- [25] Florinsky I V. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998,12(1):47-61.
- [26] Shary P A, Sharaya L S, Mitusov A V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis[J]. Geoderma, 2002,107(1):1-32.
- [27] 秦承志,朱阿兴,李宝林,等.基于栅格DEM的多流向算法述评[J]. 地学前缘,2006,13(3):91-98. [Qin C, Zhu A, Li B, et al. Review of multiple flow direction algorithms based on gridded digital elevation model[J]. Earth Science Frontiers, 2006,13(3):91-98.]
- [28] Qin C, Zhu A X, Pei T, et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2007,21(4):443-458.
- [29] Gallant J C, Dowling T I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas[J]. Water Resources Research, 2003,39(12):1347-1360.
- [30] MacMillan R A, Pettapiece W W, Nolan S C, et al. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000,113(1):81-109.
- [31] Schmidt J, Hewitt A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position[J]. Geoderma, 2004,121:243-256.
- [32] 秦承志,朱阿兴,施迅,等.坡位渐变信息的模糊推理[J]. 地理研究,2007,26(6):1165-1174,1307. [Qin C, Zhu A, Shi X, et al. Fuzzy inference of spatial gradation of slope positions[J]. Geographical Research, 2007,26(6): 1165-1174,1307.]
- [33] Qin C Z, Zhu A, Shi X, et al. Quantification of spatial gradation of slope positions[J]. Geomorphology, 2009,110: 152-161.
- [34] Jasiewicz J, Stepinski T F. Geomorphons: A pattern recognition approach to classification and mapping of landforms[J]. Geomorphology, 2013,182:147-156.
- [35] 康鑫,王彦文,秦承志,等.多分析尺度下综合判别的地形元素分类方法[J]. 地理研究,2016,35(9):1637-1646. [Kang X, Wang Y, Qin C, et al. A new method of landform element classification based on multi-scale morphol-

- ogy[J]. *Geographical Research*, 2016,35(9):1637-1646.]
- [36] Zhu A X, Wang R, Qiao J, et al. An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic[J]. *Geomorphology*, 2014,214:128-138.
- [37] Na J, Yang X, Dai W, et al. Bidirectional DEM relief shading method for extraction of gully shoulder line in loess tableland area[J]. *Physical Geography*, 2018,39(4):368-386.
- [38] Xiong L, Tang G, Yan S, et al. Landform-oriented flow-routing algorithm for the dual-structure loess terrain based on digital elevation models[J]. *Hydrological Processes*, 2014,28(4):1756-1766.
- [39] Smith M P, Zhu A X, Burt J E, et al. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey [J]. *Geoderma*, 2006,137(1):58-69.
- [40] Quinn P, Beven K J, Lamb R. The $\ln(a/\tan b)$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework[J]. *Hydrological Processes*, 1995,9:161-182.
- [41] 张宏鸣,杨勤科,李锐,等.流域分布式侵蚀学坡长的估算方法研究[J].*水利学报*,2012,43(4):437-443. [Zhang H, Yang Q, Li R, et al. Research on the estimation of slope length in distributed watershed erosion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012,43(4):437-443.]
- [42] Zhou Q M, Liu X J. Error assessment of grid-based flow routing algorithms used in hydrological models[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002,16(8):819-842.
- [43] Zhou Q, Liu X. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties[J]. *Computers and Geosciences*, 2004,30:369-378
- [44] Qin C Z, Bao L L, Zhu A X, et al. Artificial surfaces simulating complex terrain types for evaluating grid-based flow direction algorithms[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013,27(6):1055-1072.
- [45] Gallant J C, Hutchinson M F. A differential equation for specific catchment area[J]. *Water Resources Research*, 2011,47(5):W05535.
- [46] 汤国安,刘学军,房亮,等. DEM及数字地形分析中尺度问题研究综述[J]. *武汉大学学报·科学信息版*, 2006,31(12):1059-1066. [Tang G, Liu X, Fang L, et al. A review on the scale issue in DEMs and digital terrain analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006,31(12):1059-1066.]
- [47] 秦承志,呼雪梅.栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J].*地理研究*,2014,33(2):270-283. [Qin C, Hu X. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis[J]. *Geographical Research*, 2014,33(2): 270-283.]
- [48] Lindsay J B. Sensitivity of channel mapping techniques to uncertainty in digital elevation data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006,20(6): 669-692.
- [49] Qin C Z, Bao L L, Zhu A X, et al. Uncertainty due to DEM error in landslide susceptibility mapping[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(7):1364-1380.
- [50] 张磊,汤国安,李发源,等.黄土高原沟沿线研究综述[J].*地理与地理信息科学*,2012,28(6):44-48. [Zhang L, Tang G A, Li F Y, et al. A review on research of Loess shoulderline[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2012,28(6):44-48.]
- [51] Qin C Z, Zhu A X, Qiu W L, et al. Mapping soil organic matter in small low-relief catchments using fuzzy slope position information[J]. *Geoderma*, 2012,171-172:64-74.
- [52] Wang L, Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2006,20:193-213.
- [53] Liu Y, Zhang W, Xu J. Another fast and simple DEM depression-filling algorithm based on priority queue structure [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2009,2: 214-219.
- [54] Zhou G, Sun Z, Fu S. An efficient variant of the Priority-Flood algorithm for filling depressions in raster digital elevation models[J]. *Computers & Geosciences*, 2016,90:87-96.
- [55] Xiong L Y, Jiang R Q, Lu Q H, et al. Improved priority-flood method for depression filling by redundant calculation optimization in local micro-relief areas[J]. *Transactions in GIS*, 2019,23(2):259-274.
- [56] Wang Y J, Qin C Z, Zhu A X. Review on algorithms of dealing with depressions in grid DEMs[J]. *Annals of GIS*, 2019,25(2):83-97.
- [57] Qin C Z, Zhan L J, Zhu A X, et al. A strategy for raster-based geocomputation under different parallel computing platforms[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014,28(11):2127-2144.
- [58] 宋效东,刘学军,汤国安,等.并行数字地形分析的容错算法研究[J].*地理与地理信息科学*,2013,29(2):1-5. [Song X D, Liu X J, Tang G A, et al. Research on the fault-tolerant algorithm of parallel digital terrain analysis[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2013,29(2):1-5.]
- [59] Qin C Z, Zhan L. Parallelizing flow-accumulation calculations on Graphics Processing Units: from iterative DEM pre-processing algorithm to recursive multiple-flow-direction algorithm[J]. *Computers & Geosciences*, 2012,43:7-16.
- [60] Jiang L, Tang G, Liu X, et al. Parallel contributing area calculation with granularity control on massive grid terrain datasets[J]. *Computers & Geosciences*, 2013,60:70-80.
- [61] Qin C Z, Ai B B, Zhu A X, Liu J Z. An efficient method

- for applying a differential equation to deriving the spatial distribution of specific catchment area from gridded digital elevation models[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 100:94-102.
- [62] Guan Q F, Clarke K C. A general-purpose parallel raster processing programming library test application using a geographic cellular automata model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24:695-722.
- [63] Guan Q F, Zeng W, Gong J F, et al. pRPL 2.0: Improving the parallel raster processing library[J]. *Transactions in GIS*, 2014, 18:25-52.
- [64] Shook E, Hodgson M E, Wang S, et al. Parallel cartographic modeling: A methodology for parallelizing spatial data processing[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2016, 30(12):2355-2376.
- [65] 艾贝贝,秦承志,朱阿兴.栅格地理计算并行算子对区域计算算法并行化的可用性分析——以多流向算法为例[J].*地球信息科学学报*, 2015, 17(5):562-567. [Ai B B, Qin C Z, Zhu A X. Parallelization of regional operation algorithm using parallel raster-based geocomputation operators[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(5):562-567.]
- [66] Qin C Z, Zhu A X, Pei T, et al. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient[J]. *Precision Agriculture*, 2011, 12(1):32-43.
- [67] Tarboton D G. Terrain analysis using Digital Elevation Models in hydrology[C]. 23rd ESRI International Users Conference, San Diego, California, July 7-11, 2003.
- [68] Lindsay J B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 95:75-84.
- [69] 秦承志,卢岩君,包黎莉,等.简化数字地形分析软件(SimDTA)及其应用——以嫩江流域鹤山农场的坡位模糊分类应用为例[J].*地球信息科学学报*, 2009, 11(6):737-743. [Qin C Z, Lu Y J, Bao L L, et al. Simple Digital Terrain Analysis software (SimDTA 1.0) and its application in fuzzy classification of slope positions[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6):737-743.]
- [70] Zhu L J, Zhu A X, Qin C Z, et al. Automatic approach to deriving fuzzy slope positions[J]. *Geomorphology*, 2018, 304:173-183.
- [71] Wang S, Anselin L, Bhaduri B, et al. CyberGIS software: A synthetic review and integration roadmap[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(11):2122-2145.
- [72] Yang C, Raskin R, Goodchild M, Gahegan M. Geospatial Cyberinfrastructure: Past, present and future[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(4):264-277.
- [73] Yang C, Huang Q, Li Z, et al. Big data and cloud computing: Innovation opportunities and challenges[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2017, 10(1):13-53.
- [74] Desconnets J C, Giuliani G, Guigoz Y, et al. GEOCAB Portal: A gateway for discovering and accessing capacity building resources in Earth Observation[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 95-104.
- [75] U.S. Geological Survey. The national map: New data delivery homepage, advanced viewer, lidar visualization [EB/OL]. US. Geological Survey Fact Sheet 2019-3032. 2019. <https://doi.org/10.3133/fs20193032>
- [76] Yue P, Di L, Yang W, et al. Semantics-based automatic composition of geospatial Web service chains[J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33:649-665.
- [77] Zhao P, Foerster T, Yue P. The geoprocessing web[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 47:3-12.
- [78] Zhu Y, Yang J. Automatic data matching for geospatial models: A new paradigm for geospatial data and models sharing[J]. *Annals of GIS*, 2019, 25(4):283-298.
- [79] Maguire D J, Longley P A. The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29:3-14.
- [80] Usery E L, Varanka D E, Davis L R. Topographic mapping evolution: from field and photographically collected data to GIS production and linked open data[J]. *The Cartographic Journal*, 2018, 55(4):378-390.
- [81] Lin H, Chen M, Lu G. Virtual Geographic Environment: A workspace for computer-aided geographic experiments [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2013, 103(3):465-482.
- [82] Chen M, Yue S, Lü G, et al. Teamwork-oriented integrated modeling method for geo-problem solving[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 119:111-123.
- [83] Hou Z W, Qin C Z, Zhu A X, et al. From manual to intelligent: A review of input data preparation methods for geographic modeling[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(9):376.
- [84] 吴雪薇,秦承志,朱阿兴.数字地形分析应用适配性知识的案例表达与推理应用方法[J].*地理科学进展*, 2016, 35(1):89-97. [Wu X W, Qin C Z, Zhu A X. Case-based formalization and inference method of application-matching knowledge on digital terrain analysis[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(1):89-97.]
- [85] Qin C Z, Wu X W, Jiang J C, et al. Case-based knowledge formalization and reasoning method for digital terrain analysis: Application to extracting drainage networks[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20:3379-3392.
- [86] Wilson J P. Environmental applications of digital terrain modeling[M]. Hoboken, N J: Wiley Blackwell, 2018.