

面向虚拟地理环境构建的地理分析模型集成应用方法进展

乐松山, 闫国年, 温永宁, 陈旻

1. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023;
2. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京 210023;
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要:地理分析模型作为求解地理问题、模拟地理环境、支撑决策分析的重要资源,在虚拟地理环境(或数字孪生地理环境)的构建中发挥着重要作用。集成多领域具备不同模拟能力的地理分析模型,能够更加全面的表达现实地理环境,支撑构建可视、可用、可分析、可交互的虚拟地理环境。针对地理分析模型的集成应用方法,本文系统性梳理了当前的研究进展,从地理分析模型的演进特征、支撑虚拟地理环境构建的途径、多模型的集成方法和地理信息服务的相关支撑技术等方面进行了综述。总结发现,通过多模型集成来解决复杂地理问题已经成为广泛认可的研究途径,自然—人文相结合、融合大数据与深度学习的集成建模也越来越受到关注。然而,现有模型集成方法仍然面临个案化的局限,在处理异构模型的兼容性方面难以形成持续可复用的集成成果,导致模型集成容易陷入到重复的技术改造工作中。借鉴信息服务领域的容器化理念,本文提出了“地理分析模型容器”的思路并进行了方法实现。通过设计柔性装配结构的信息交互通道和事件响应机制的功能计算通道,构建了能够持续积累和提升模型集成复用能力的容器,并基于此种模型容器来进行配置式的模型集成应用。

关键词: 遥感, 地理分析模型, 虚拟地理环境, 数字孪生地理环境, 模型集成, 地理分析模型容器

中图分类号: P2

引用格式: 乐松山, 闫国年, 温永宁, 陈旻. 2024. 面向虚拟地理环境构建的地理分析模型集成应用方法进展. 遥感学报, 28(5): 1262–1280

Yue S S, Lyu G N, Wen Y N and Chen M. 2024. Progresses in integrated application methods of geographic analysis models for virtual geographic environment construction. National Remote Sensing Bulletin, 28(5): 1262–1280 [DOI:10.11834/jrs.20233005]

1 引言

数字化时代的到来和信息技术的发展,深刻驱动着地理学研究范式的演进,其不再局限于自然和人文空间,越来越注重于对三元空间(自然物理空间、人文社会空间和信息空间)的综合研究(李双成等, 2022; 闫国年等, 2022)。各类自然要素和人文要素均可以在信息空间中加以表达,并能够通过调控信息要素来与自然和人文空间产生相互作用。在此趋势下,学术界和工业界均开展了形式多样的探索。尤其是虚拟地理环境、数字孪生、元宇宙等理念和框架相继提出,

在虚拟场景或者孪生空间中表达地理环境、刻画地理规律、解决地理问题,已经成为行之有效的研究手段和实践途径(Batty, 2018; 林琿等, 2020; 冶运涛等, 2022)。无论是虚拟场景,还是孪生空间,都强调不仅仅是对现实世界的可视化表达,更需要将要素关联关系、作用机制、演化过程有机融合,实现兼顾表达与计算的虚实交互(闫国年, 2011; Lin等, 2022; 肖超伟等, 2022)。地理分析模型作为求解地理问题、模拟地理环境、支撑决策分析的重要资源,在其中发挥着重要且基础的作用。复用和集成多领域、具备不同模拟分析能力的模型,能够更加全面的表达现实地理

收稿日期: 2023-01-11; 预印本: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41930648, 42171406, 42071363, 42071361); 国家重点研发计划(编号:2021YFB3900901)

第一作者简介: 乐松山, 研究方向为地理场景建模、虚拟地理环境、泛在数据挖掘。E-mail: yuesongshan@njnu.edu.cn

通信作者简介: 陈旻, 研究方向为开放式地理建模与模拟、虚拟地理环境。E-mail: chenmin0902@163.com

环境,从而支撑构建可视、可用、可分析、可交互的“虚拟地理环境”(Batty, 1997; Lin 等, 2013; Voinov 等, 2018; Rink 等, 2020)。

地理分析模型集成是一个基于不同层次的科学概念,可以被理解为研究思路、方法、工具、平台等(宋长青等, 2018)。相比于单个模型,多模型集成能够在多要素、多过程融合的基础上提升对客观地理世界的理解。无论是单领域内的模型集成,还是跨领域间的模型集成,最终都必然涉及到在具体计算环境中多个模型的组合、嵌套、连接等基础性的执行环节。针对此,定制式集成和模块式集成是当前地理分析模型集成研究的主要途径。前者主要是为特定模型定制的自限型集成运行方案,后者主要是基于组件装配的理念将模型进行标准化改造。面向具体地理问题的求解,定制式集成能够充分考虑所涉及到模型的认知和技术特征,从而快速定制集成;但此种方法受模型个体特征的影响较大,待集成模型数量较多时,容易陷入到难以持续的集成方案修订活动中。模块式集成以标准化的组件为基础,组件之间的关联逻辑较为清晰,且单个组件支持替换;但此种方法伴有强烈的技术依赖,标准化改造受到编程语言、数据结构、运行环境等诸多因素的制约。事实上,当前模型集成研究总是在定制式与模块式两者之间徘徊,前者的可持续性不强,后者又局限于兼容性。

在信息科学和管理科学领域,同样面临异构业务系统集成的问题。随着云计算、面向服务架构、大数据等理论方法的不断推动,以虚拟化计算和微服务为主要特征的容器技术逐渐体系化并受到广泛关注和认可(Wang 等, 2019; Coon 和 Shuai, 2022)。借助于容器化的理念,将地理模型所依赖的数据、算法和计算资源装载在“容器”中,在容器内部模型定制式发展,在容器外部开展模块化的模型集成工作,有望在定制式和模块式集成方法之间取得平衡,提升地理建模与模拟工作的整体效能。然而,现有容器方案并不能够满足地理模型集成应用的需求,相比于业务信息系统的集成,地理模型的集成应用具有更高的复杂性和综合性。作为对客观地理世界的抽象与表达,不同地理模型的抽象与表达方法具有强烈的异构性特征,难以通过固定的数据结构和功能接口来兼容个性化的地理认知,从而导致基于现有

容器方案的模型集成又重新回归到简单的软件调用。面对具体地理问题的求解,需要在要素、过程、作用关系等方面开展多层次、多粒度、多尺度的集成,发展适应于地理系统演化规律和驱动机制表达的“地理分析模型容器”成为研究的关键。

聚焦于如何构建以分析计算为内核的虚拟地理环境,本文总结、归纳了地理分析模型的特征和集成应用相关进展;围绕地理分析模型的开放式应用现实需求,提出了发展“地理分析模型容器”的构想。通过相关技术方法的探索,设计并实现了将模型构建与运行、模型改进与实践、模型集成与应用三者进行有机解耦的模型容器,促进地理分析模型从科研工具朝着社会服务的基础设施迈进,提升地理分析模型对于虚拟地理环境构建的效能。

2 地理分析模型的集成应用进展分析

2.1 地理分析模型的演进特征

地理学研究所关注的地理系统是由自然与人文要素构成的复杂系统,系统内各要素在时间和空间上发生着紧密的相互作用,形成了具有整体性和复杂性特征的统一体(陆大道, 2015; 宋长青等, 2018; 樊杰, 2018)。地理分析模型是在规律性地理认知的基础上,对地理系统中格局、过程和机制等进行定量刻画的结果。相比于同样基于地理认知的数据模型研究,地理分析模型更注重对于地理规律的动态模拟和分析,集中体现在模型程序的配置执行方面。同时,在地理分析模型的构建和应用过程中,往往需要与具体的数据模型相结合,两者相辅相成、交叉依赖。随着地理认知程度的加深、数据采集与观测能力的增强,地理分析模型也在不断朝着精细化和系统化的方向发展。

地理分析模型研究具有强烈的专业性特征,其设计、开发和更新等工作都与领域紧密相关。例如,水文领域的学者通过代数学、数值模拟等方法,研发了SWAT、SWMM、新安江模型、FVCOM等模型(Huber和Dickinson, 1988; Zhao, 1992; Chen等, 2003; Douglas-Mankin等, 2010; Trotter等, 2022),从而对自然流域、城市区域、海洋湖泊等开展模拟分析(李云良等, 2013; 石

树兰等, 2019; 朱阿兴等, 2019; 宋振亚等, 2022); 大气领域的学者针对气候变化的评估与预测, 基于能量守恒、动量守恒等基本物理化学定律, 建立了诸多气候系统模式 (Bao 等, 2013; Li 等, 2013; 林岩鑫等, 2019; 刘春蓁等, 2023), 并针对空气质量和气象状况的模拟预测, 构建了 WRF、CMAQ、MEGAN 等模型 (Binkowski 和 Roselle, 2003; Guenther 等, 2006; Davis 等, 2008; Johansson 等, 2022); 在地形地貌领域, 通过研究地球系统动力学, 基于有限元差分、粒子模拟等方法构建了 CHILD、MRSAA、SNAC 等模型 (Tucker 等, 2001; Choi 等, 2008; Zhang 等, 2015), 由此对土壤侵蚀、泥沙输送、断层构造过程进行建模分析 (Collins 等, 2004; Tucker 和 Hancock, 2010; 魏梦瑶等, 2020); 生态学领域针对森林、草地、湖泊、湿地、农田等生态系统开展了诸多关于碳氮等物质循环的模拟研究, 构建了 LPJ、IBIS、Biome-BGC、AVIM 等生物地球化学模型和动态全球植被模型 (Running 和 Hunt, 1993; Foley 等, 1996; Sitch 等, 2003; Tong 等, 2022), 并从种群分布、生物多样性、群落关系等方面开展相关的建模研究 (Griffith 和 Peres-Neto, 2006; Rashidi 等, 2015; 曾莉等, 2018)。此外, 面向人类活动的模拟, 基于元胞自动机、社会力、时空聚类、贝叶斯网络等分析方法的模型被广泛关注 (李丹等, 2016; 傅子洋等, 2016; 张开冉等, 2017), 并对城市扩张、应急疏散、疾病分布、犯罪预测、社会经济变化提供决策支持 (黎夏等, 2007; 王劲峰等, 2017; Roth 等, 2016; 龚建华等, 2018; 柳林等, 2019)。

契合于地理学的经验科学、实证科学和系统科学等研究范式, 地理分析模型的建模方法主要可以分为两种: 基于动力学机制的过程建模和基于统计理论的分析建模 (Korzukhin 等, 1996; 宋长青, 2016)。机理过程模型主要是从地理要素在时空中的分布和演变需要遵循基本的物理、化学、生物规律出发, 通过经验或者实证参数的手段在计算程序中重现其动态过程; 典型的如生态系统模型中对于各种光合、呼吸、分解、凋落、分配等过程的模拟 (Falkowski 等, 2000), 城市街道噪声模型中对于声源发生、声音传播、遮挡物折射/反射等过程的模拟 (方文杰, 2017)。统计分析模型主要是以统计理论为基础, 重点关注于地理要

素间的数量、拓扑和相关等关系的刻画, 其不直接反映动力学机制, 而是将机理过程内化在数据分析处理之中; 典型的如地统计 GWR 模型、时空聚类模型 DBSCAN、地理探测器模型 GeoDetector 等 (Brunsdon 等, 1998; Birant 和 Kut, 2007; Wang 等, 2017)。近年来, 随着地理大数据和人工智能研究的兴起, 以海量数据及其深度挖掘为特征的建模研究也广受关注, 其多基于规则归纳、语义提取、深度学习、模糊集、粗糙集等理论方法, 探索地理系统各要素间的相互关系 (刘瑜等, 2014; 李清泉和李德仁, 2014; 吴志峰等, 2015)。

总体来看, 地理建模与模拟研究一直是地理学各领域的持续热点, 研究者在地理学各分支学科构建了诸多的地理分析模型。伴随着物联网、云计算、深度学习等信息技术的推动, 模型不断更新, 其模拟和预测能力逐渐增强。另外, 复杂的现实世界和主观的认知过程也导致了模型存在明显的尺度适用性和区域相关性; 近年来, 相关模型工具的开发逐渐成为趋势, 也说明地理分析模型研究在朝着更高的易用性和适用性方向发展。

2.2 虚拟地理环境中的地理分析模型应用

虚拟地理环境围绕如何在计算机中生成数字化的地理环境, 通过人机交互、多维感知、模分析、动态模拟、群体协同等方面的研究和探索, 力图实现对复杂地理系统的感知、认知和综合实验分析 (龚建华等, 2010; 徐丙立等, 2018; Lü 等, 2018; 林琨等, 2020)。就直观呈现结果而言, 虚拟地理环境通常利用动态可视化、虚拟现实、增强现实、混合现实等技术来构建相应的数字表达环境。但超越于视觉上的感知, 虚拟地理环境的内涵更加注重于如何科学的认知地理规律, 从而能够基于计算模型来反演过去、刻画现在、预测未来 (闫国年等, 2021; 陈旻等, 2021; Tan 等, 2022)。由此, 在地理数据库和地理模型库的共同支撑下, 研究者们构建了不同的虚拟地理环境, 相关的建模主题如空气污染模拟 (徐丙立等, 2009)、人群活动与疏散 (龚建华等, 2018)、森林林木生长 (Tang 等, 2019)、滑坡灾害 (朱军等, 2020)、溃坝风险评估 (Yu 等, 2021)、三维城市规划 (Chassin 等, 2022) 等。相关的专业模型通过技术改造, 形成各专题虚拟地

理环境的计算组件,实现多维动态可视化与机理过程模拟、地理问题求解分析的融合。

与虚拟地理环境理念类似的是数字孪生(Digital Twin),两者都关注于如何将现实世界进行数字化表达,并达到虚实互济的目标。虚拟地理环境起源于地理学,其侧重于将地理规律与自然—人文要素融合表达。数字孪生则起始于工业界,从物理产品的数字化映射,逐渐发展到数字孪生城市、数字孪生流域、数字孪生地球等更为广泛的领域(李双成等,2022;杨滔和单峰,2022;张新长等,2023)。相比于虚拟地理环境,数字孪生因其脱胎于产品孪生、车间孪生、工厂孪生,更加注重于物理实体与数字要素的映射、关联和交互(陶飞等,2017;Li等,2022)。围绕智慧城市、智慧水利、流域管理、铁路运维等实际需求,诸多数字孪生的探索和实践已经开展,尤其是以数字孪生城市和数字孪生流域的建设为典型(郭仁忠等,2020;冶运涛等,2022)。利用三维实景模型、物联网实时感知、高速5G互联、逼真高效显示等技术,数字孪生在信息整合和数据管理方面的优势尤为凸显(臧钊,2022;朱思宇等,2023;王朔等,2023)。然而,一个与物理空间完全孪生的数字空间仍无法解决人类对于生存发展不确定性的“恐惧”。数字孪生需要能够理解过去从而预测未来、理解地理过程从而辅助优化决策、理解人类活动模式从而指导可持续发展的路径。这种“理解”能力与人工智能(如大语言模型ChatGPT)还不完全相同,其需要通过“已知的知识”来给出答案,更需要提供交互通道来支持用户挖掘“未知的知识”。以智慧水利建设为典型,如何将各种水文/水动/水生态模型与地理实景数据、实时监测数据进行整合,提升预报、预警、预演、预案能力,已经成为当前研究热点(朱跃龙等,2022;梅传贵等,2023)。

构建一个具备分析和模拟能力的虚拟地理环境/数字孪生空间,其需要能够表达作用机理的地理过程模型,也需要以数据分析和数理统计为基础的地理统计模型。利用虚拟地理环境/数字孪生空间中实时感知的环境参数,地理过程模型可以进行数据同化和模拟预测(如水位预报、气象预报等模型)(Tan等,2021),地理统计模型同样可以依据内涵的地理规律为用户提供分析结果(如时空聚类、要素关联、因果推断等模型)(裴韬

等,2021)。地理过程模型和地理统计模型两者在虚拟地理环境/数字孪生空间中没有显著的区别;通常而言,地理统计模型与用户的交互和主观分析相关度较大。地理分析模型(包括过程模型和统计模型)本身也是对地理环境的认知,其带有强烈的研究领域和研究尺度特征。虚拟地理环境/数字孪生空间更加强调多学科交叉、多业务部门融合,驱动跨尺度、多维度的地理环境模拟。

总体来看,地理分析模型是模拟地理环境动态变化与演化的核心部分,与虚拟地理环境和数字孪生之间有着密切的联系。一方面,数字孪生通过对真实物体的数字化重建和运行状态实时监测,为地理分析模型提供精准和实时的数据支持。另一方面,在虚拟地理环境或者数字孪生空间中,地理分析模型可以对其中的地形、地貌、水文、城市等虚拟三维环境和数据进行计算和模拟,从而反演和预测真实地理环境中的各种变化和演化过程。然而,当前虚拟地理环境/数字孪生平台构建的过程中,对于地理分析模型的引入仍然采用内嵌的方式,能以形成一套地理分析模型组件适用于不同的应用平台。

2.3 地理分析模型的集成方法

新时期的地理学研究已经发展成为多学科交叉、多部门参与的综合性学科,地理学各领域纵向上朝着更深入更精细方向发展的同时,横向上也越来越关注于跟其他领域的交叉融合(傅伯杰,2018;宋长青等,2020)。“集成”研究的概念在地理学各研究领域受到广泛的关注,尽管各学科对其内涵解读尚不统一,但其基本形式是将分散的个体整合在一起并产生联系,从而构成有机的整体(占车生等,2018;刘海猛等,2019)。地理分析模型的集成是当前地理学研究的重要途径之一,从地理要素、地理空间、地理界面、空间尺度、地理关系、指标解译等多个层面开展了集成建模的研究工作(宋长青等,2018)。针对不同的研究目标,诸多概念方法与模型集成相关,如耦合、融合、同化等。其中有两个方面的研究工作比较典型:(1)基于GIS的模型集成,利用GIS的数据组织、管理和可视化表达方法,将不同的地理模型进行功能集成,并结合GIS的空间分析能力在实用工具方面展开探索(Sui和Maggio,1999;黄宏胜,2009;陈应跃等,2015;Habtue和

Jayappa, 2022); (2) 大气科学领域的模式耦合, 在研究不同天气模式和气候模式的基础上, 耦合大气运动过程、物理化学过程、大气边界与下垫面等, 形成了海气耦合、陆气耦合、海陆气耦合等多种研究成果, 并开发了相应的耦合器(周天军等, 2004; 刘喜迎, 2010; 刘武等, 2018; Mishra等, 2022)。

地理分析模型的集成研究通常与具体的研究区域和应用需求紧密相关, 从集成的目标导向性考虑, 主要有两种形式的模型集成研究: (1) 面向具体问题的集成建模, (2) 面向异构模型构建的集成框架。第1种形式的集成建模工作通常以具体的研究区域为目标, 针对特定的研究对象, 将多个地理模型进行组合并形成新的集成模型或者模拟平台。例如, 集成空间扩展模型和地理加权回归模型, 对城市住房价格空间分异进行分析(孙倩和汤放华, 2015); 集成Dyna-CLUE改进模型和SD模型, 对山区城镇用地情景进行模拟研究(严冬等, 2016); 面向流域管理的GIBSI模拟平台和决策支持系统(Rousseau等, 2000; 赵彦博等, 2013), 集成多个生态-水文模型的黑河流域集成建模环境HOME(程国栋等, 2014)等。相比于第1种定制式的集成形式, 第2种构建集成建模框架的研究主要是探索如何通过模块的方式为建模者提供创建集成模型的工具, 其本身一般并不直接提供已经集成的模型。例如, OpenMI, BMI, OMS, SME, ESMF等(Hill等, 2004; Moore和Tindall, 2005; David等, 2013; Peckham等, 2013; Yu等, 2022)。在集成建模框架中需要定义明确的开发接口, 使得异构的地理模型能够经过改造, 成为建模框架认可的“标准件”, 进而驱动模型按照模块组件进行集成(Shrestha等, 2013; Qi等, 2018; Hughes等, 2022)。

前述两种形式的模型集成研究都需要涉及到具体的模型集成方法, 即如何在计算环境中将多模型联系起来。首先, 通过数据交换的方式是常用的方法, 如基于NetCDF、Shapefile、GeoTIFF以及各种定制的数据格式来驱动模型计算结果的转换和交换(Roberts等, 2010; 严华雯, 2012)。其次, 基于过程融合的方式主要是将模型内部功能在程序代码层次进行整合, 通过内存变量的形式实现多个模型的集成, 如GCAM模型通过代码整合的方式将Hector、MAGICC等作为模块集成到一

起(Kim等, 2006), SEIMS模型基于并行计算的框架按照内存交互的方式对SWAT、LISEM、DHSVM、CASC2D等模型进行了集成(Zhu等, 2019)。另外, 随着网络服务技术的发展, 基于服务接口的模型共享和集成也成为一种切实可行的方法, 典型的如GeoBrain(Di, 2004), HydroShare(Tarboton等, 2023), GeoModeling(Wen等, 2013), GeoSquare(Wu等, 2015), OpenGMS(Chen等, 2019)等。在具体的集成建模中, 这几种方法通常被交叉使用。

总体来看, 地理分析模型的集成研究是地理学研究的重要活动, 通过集成模型可以更整体的模拟客观地理世界, 并辅助更全面的决策。面向具体问题所构建的集成模型, 在面对更复杂的问题需求时仍然能力不足, 需要与更多的模型进行集成研究。在特定模型之间定制式的集成方法往往并不适用于新加入的模型, 使得模型集成工作难以持续。通过集成建模框架的研究, 在理论上能够将所有的模型都按照模块组装, 适用于各种集成模型的构建。但是, 为了能够加入到集成建模框架中, 地理模型必须要经过标准化改造: 一方面模型改造的工作量较大, 另一方面模型本身的更新完善也与集成建模框架脱节; 而且不同建模框架之间也存在地理认知、技术策略上的差别, 又形成了另一种形式的封闭。

2.4 地理信息服务的相关方法

地理分析模型作为地理科学与信息科学的结合体, 其研究与地理信息和服务领域的发展交叉关联。从地理模型集成所面对的多样化地理认知角度而言, 地理信息GIS领域对于现实地理世界的抽象与表达方法在其中起到了重要的作用; 从地理模型集成应用的技术支撑而言, 信息服务领域对于异构系统和信息的处理方法也扮演了重要的角色。

异构地理模型能否被合理地复用和集成, 首先需要面对的命题就是在地理认知上是否统一。客观地理世界的复杂性导致了各种地理要素和过程具有多解释性特征, 不同地理模型对于同一地理要素的认知也存在差别, 如何在地理认知层面进行关联和统一是地理模型集成研究的首要问题。地理信息领域长期以来关注于地理要素在语义、位置、几何、属性、空间关系等方面的抽象与表

达方法，从二维/三维表达方法逐渐发展到时空数据模型的构建（李德仁等，1994；Goodchild等，2007；周成虎，2015）。其中基于场和基于对象表达是经典的表达方式，如栅格模型、镶嵌模型、简单要素模型、拓扑模型等（龚健雅，1997；郭伦等，2000；Cova和Goodchild，2002；Liu等，2008）。这些数据表达方法及其相应的组织存储方法，在地理模型的构建和复用中通常扮演了基础地理数据组织和交换的作用。但二三维的数据表达手段主要是针对几何和属性信息的，难以在时空过程和要素关系的表达方面起到作用。因而，时空数据模型的研究逐渐成为GIS的核心内容。其基本思路是将空间维和时间维相结合，并强调表达时空目标的变化。针对地理要素在时空状态层面的表达，构建了序列快照模型、基态修正模型、时空立方体模型、时空复合体模型等（Langran，1992；刘仁义和刘南，2002；程昌秀等，2003；张保钢等，2005；刘岳峰等，2009）；针对时空过程和事件的表达，构建了基于事件的时空数据模型、基于对象生命周期的时空数据模型、以过程为核心的时空数据模型、综合序列快照模型、基态修正模型、融合时空过程—对象—事件等要素的时空数据模型（Reitsma和Albrecht，2005；尹章才和李霖，2005；朱庆等，2009；Nixon和Hornsby，2010；Yi等，2014；陆妍玲等，2018；李小龙和尹涵，2019）等。整体而言，地理信息领域对于地理认知的抽象表达方法在不断发展和深化，在要素状态和分布的基础上对于时空过程的表达有了较大的进步，相关的研究也在地理模型的构建中起到了非常积极的推动作用。

面向地理模型的多源异构事实，在执行环节需要进行模型连接的处理；信息服务领域在处理异构业务功能集成方面提供了较多的策略，从硬编码集成、组件集成、接口集成到服务化集成，集成策略越来越朝着动态兼容性的方向发展（Goodall等，2013；卜晓倩等，2016；张明达等，2018）。伴随着对于地理系统完整性的认知趋势，数据获取手段和观测能力的提高，地理模型在计算能力和软硬件需求方面朝着更高的方向发展。基于分布式并行的计算框架为地理模型的计算能力提供了新的模式，通过MapReduce，Hadoop，

Spark等技术策略的支撑，诸多地理模型（尤其是依赖于大数据的模型）被开发和发展（Olasz等，2016；Omran等，2019；Shangguan等，2019）。另外，以人工智能和机器学习驱动的科学研究方法也在拓展地理模型构建的思路，利用PyTorch、TensorFlow等深度学习框架，改造传统的地理模型、开发新的地理模型（Song等，2016；崔相辉等，2017；张鹏程等，2017；Rasp等，2018）。

在大数据和人工智能等相关研究的推动下，越来越多的计算框架涌现出来。由此形成了单机计算、分布式计算、集群计算等多种计算框架共存的状态，为地理模型的复用带来了更多的不确定性。如何在多样性计算框架的基础上集成模型，近年来基于容器的集成方案可以提供相关的思路启发。以Docker为典型的容器技术尝试在单机架构、集群架构和分布式系统之间进行兼容化处理，通过微服务的策略来解决资源动态伸缩、迁移部署等问题。考虑到容器技术的优势，在地理建模领域也开展了相关的应用研究，包括基于容器的环境模型共享（Swain等，2016）、虚拟流域系统（Wu等，2018）、基于遥感分析模型的森林监测平台（Tufa等，2018）、在线生态模型平台（Zhuang等，2019）、空间信息处理平台（王博等，2021）等。现有的容器与地理模型结合的研究主要是从提高模型的易用性出发的，将模型、数据和计算依赖资源都部署到镜像中，模型的应用方式主要是通过服务接口来实现的，不同容器之间服务接口的集成仍然难以统一。

总体来看，地理信息领域在时空信息抽象、表达和组织方面的研究不断深入，为地理模型研究提供了强大的助力，也为模型复用提供了完整性更高的数据交换媒介。信息服务领域的相关技术方法不仅为地理模型的设计和研发工作提供了功能更强大的计算框架，也从计算环境的兼容性方面为地理模型的复用提供了方法支撑。然而，不断涌现的数据交换方法仍局限于特定的地理模型应用场景，基于新型计算框架研发的地理模型在复用方法层面需要考虑更多的现实约束，以易用性为导向的容器方案虽然在模型部署运行方面为模型复用提供了支撑，但在模型的更新改进、集成演化等方面仍然缺乏有效的复用方法。

3 地理分析模型的容器化集成应用

近年来国内外学者在地理模型构建、发展和应用方面取得了多元的进展。在发展已有模型、构建新模型、集成多模型等方面，当前研究主要是围绕应用个案展开的。个案化的模型成果在满足特定应用需求的同时，也为需要多领域协同、可持续积累的地理综合研究带来了极大的不确定性，导致研究者在尝试集成不同模型时，需要耗费大量的精力来进行繁琐的技术处理。由此造成了地理模型成果虽然可以通过不断的改造来迎合集成应用需求，却难以成为服务于社会实践的有序增长型基础设施。鉴于科学研究具有伦理道德约束下的自由探索属性，为不同领域的地理模型构建研究设计规定动作缺乏现实意义，因而地理模型集成方法研究是突破现状局限的关键。

对于特定某几个地理模型的集成，可以通过硬编码的方式来实现。但硬编码方案是围绕特定技术策略对涉及到的模型进行重构，这种重构可以发生在模型内部，也可以发生在连接模型的功能调用之间。无论是何种形式，模型对于重构工作都是被动的，这种重构仅服务于独立的模拟分析应用，难以形成累积式的资源，相关模型在开展其他模拟分析工作时也难以复用其成果。针对此，“地理分析模型容器”的思路是将模型集成从被动重构转变为主动提升，将模型视作可不断发展演进的主体，在容器中累积其集成复用能力，并对外提供交互通道。

地理分析模型的集成复用能力，主要受两个方面的制约：异构的地理认知和多样的功能结构。就模型的地理认知而言，其主要表达途径包括外存数据、内存变量、代码参数等，并且在具体的数据结构、组织方式、编码格式等层面还有更加细节的差异。就模型的功能结构而言，其基本结构可以总结为输入、输出和控制，但在输入输出的次序、执行流程的形式、功能调用的方式等方面又与模型程序的实现策略紧密关联。如图1所示，地理分析模型容器从这两个方面出发，设计了相应的模型信息抽取方法和功能执行方法，并基于此形成容器的交互视图（包括信息对接通道和功能响应通道）。

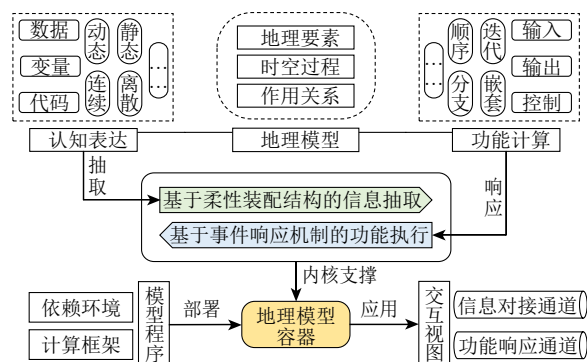


图1 地理分析模型容器的内核框架

Fig. 1 Core framework of the geographic analysis model container

在处理模型的异构化地理认知方面，容器中采用柔性装配结构来表达模型的空间结构、时间过程、作用规则等内容。该装配结构借鉴Web服务领域中利用有限的HTML元素和灵活的XML结构来表达呈现各种页面的思路，基于层次化的节点对模型的输入、输出和控制数据进行灵活表达，每个节点都具有其数据类型和行为脚本。通过节点来装配表达模型中的数据内容，并通过节点上的行为脚本来对数据内容附加约束规则和对接外部数据格式。相比于传统的中间数据格式，这种装配结构能够以对象化视角来表达模型的数据需求，在模型计算和数据资源之间形成一套数据模板，将模型对于数据格式的依赖转变成：多源数据格式向模型的数据规格进行持续的对接。层次化节点上的行为脚本同样在模型容器中管理和运行，并由此积累模型在数据接口层面的适配能力，提升模型的可集成度。

在处理模型的多样化功能结构方面，模型容器基于有限状态机的理论，构建以状态、转换、动作和事件为基本元素的模型功能状态机：将模型功能的不同执行步骤表达为状态，将多步骤的执行过程表达为转换，将具体计算表达为动作，将内外部数据交互表达为事件。其中，状态和事件通过容器对外暴露，转换和动作则在容器内部管理。通过状态的绑定、激活、溯源等接口，容器外部可以获取和配置模型功能的不同步骤；通过输入、输出和控制3种基本事件，容器外部可以为功能执行配置不同的数据。由此，通过事件响应的策略将地理模型的原始功能在容器中包装成

统一风格。从编程语言、模板工具、GUI工具等方面研究地理模型的原始功能与状态机之间的映射方法；在容器虚拟化计算的支撑下，构建模型功

能调用的中间件；通过该响应执行中间件，对外获取事件的配置信息，对在模型计算过程中动态响应其关联状态和事件。

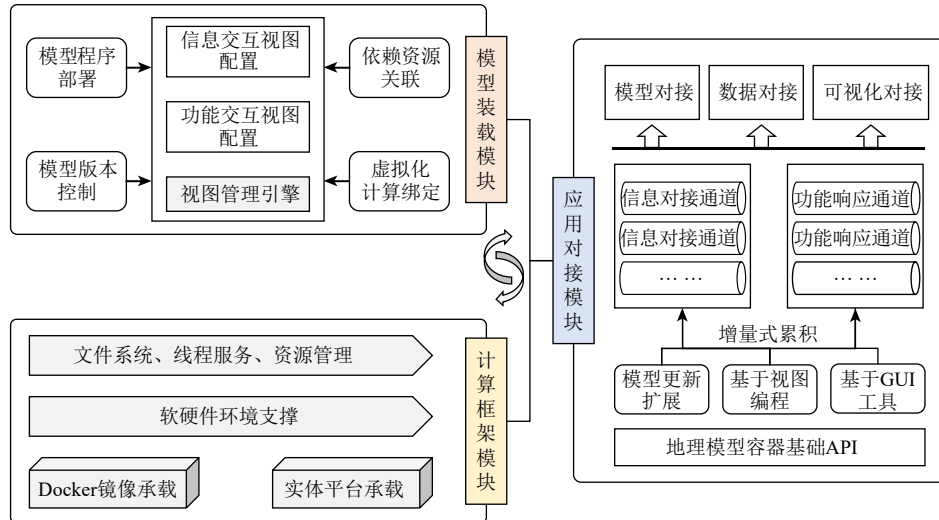


图2 地理分析模型容器的总体架构

Fig. 2 Overall architecture of the geographic analysis model container

通过模型认知表达和功能计算两个方面的兼容性处理研究，为地理分析模型容器的构建提供内核支持。基于此，模型容器的总体架构包括计算框架模块、模型装载模块和应用对接模块3个方面。在计算框架模块中，兼顾 Docker 镜像承载和实体操作系统平台，利用 Web 服务框架实现软硬件环境的配置和计算资源的管理。在模型装载模块中，主要是对模型程序进行部署，按照进程隔离的方式实现不同版本模型的融合，并对模型的交互视图和计算框架进行关联绑定。在应用对接模块中，按照增量式累积的方式为模型容器提供信息对接通道和功能响应通道，并由此支持外部模型对接、数据对接和可视化对接等应用需求。

基于上述模型容器的设计理念和技术方法，本研究构建了开放式地理建模与模拟平台 OpenGMS (Open Geographic Modeling and Simulation, <https://geomodeling.njnu.edu.cn> [2023-01-11])。在 OpenGMS 平台中，以模型容器为内核支撑，按照微服务的方式形成了地理分析模型服务数千组，实现了模型的在线运行与集成。如图3所示，在地理分析模型容器中，能够将不同的模型、模型的不同版本进行统一管理，并与单机式、集群式和

分布式的计算架构进行对接，实现模型的容器化服务。以集成工作流为基础，将不同的模型容器在信息和功能交互通道层面进行关联配置，能够实现异构模型的集成应用。集成后的模型能够继续反馈到容器中，形成模型容器的方案级资源，进一步支撑后续的集成应用。

以城市雨洪模拟为典型场景，本研究初步开展了利用模型容器来支撑城市区域环境建模、雨洪过程模拟、防洪排涝预案定制等研究工作。城市雨洪模拟对于建设海绵城市、解决城市内涝问题具有非常重要的作用，其模拟结果能够指导城市开发、改造排水管网、优化防灾减灾措施。当前已有的城市雨洪模拟工作，整体上处于个案化的模型实例状态，难以跟整个数字孪生城市建设融合。而正在开展的各种包含雨洪模拟功能的数字孪生城市工作，又往往与具体的平台紧密绑定，难以形成可复用的公共服务。因此，基于地理分析模型容器的理念，本研究将 SWMM 模型、LISFLOOD-FP 模型、ANUGA 模型、HEC-RAS 模型、FVCOM 模型等进行了容器化承载，实现模型计算功能、模型参数配置、模型应用实例等在容器中有序积累，并按照中立的服务接口与虚拟地理环境、数字孪生平台进行对接。

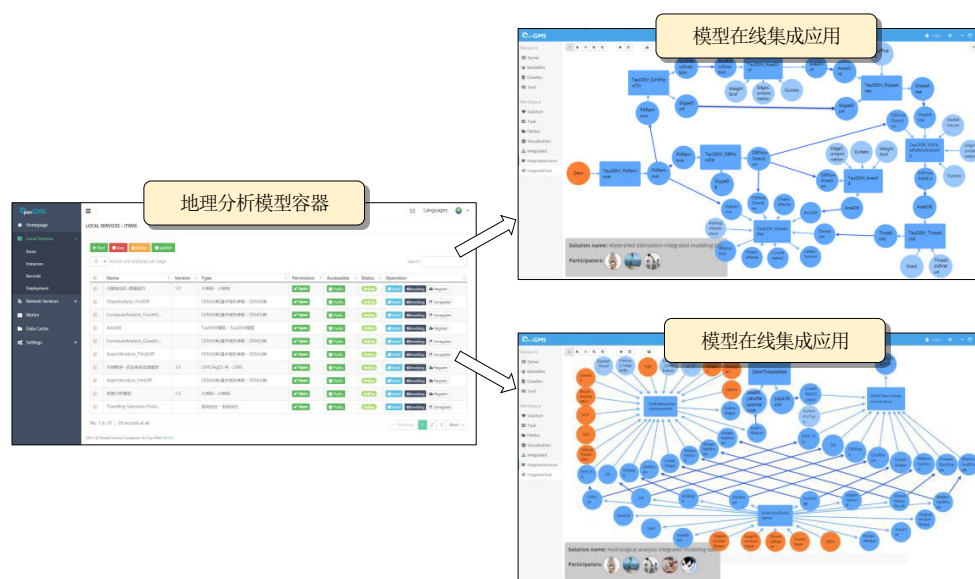


图3 地理分析模型容器与在线集成应用系统

Fig. 3 Geographic analysis model container and online integrated application system

如图4所示,城市雨洪模拟涉及到坡面漫流、管网排水、河道汇水—排水、水塘蓄水等多种复杂过程。雨洪模拟结果好坏依赖于基础地理数据的质量(如地形的精度、管网数据的精度、地块边界的精度等),也依赖于参数的合理设置(如管道曼宁系数、地块曼宁系数、子汇水区的产汇流相关参数等)。以SWMM模型为例,其所在的模型容器中包含有苏州汾湖区域的实例组和南京江北新区区域的实例组。在汾湖实例组中,包含有汾湖研究区域的模型本地化参数(如子汇水区的平

均坡度、管道和地块的曼宁系数等);通过容器的信息对接通道能够获取这些参数和数据,并可以与其他平台进行融合以及可视化表达,通过容器的功能对接通道能够调用SWMM模型的计算功能,并将结果积累在模型容器中。此外,汾湖实例组中还包括不同的降雨强度情景,每种情景都对应一个模型实例,能够独立对外提供数据和功能服务。与汾湖实例组类似,SWMM模型容器中的江北新区实例组同样包含本地化的模型和可复用的情景化模型实例。

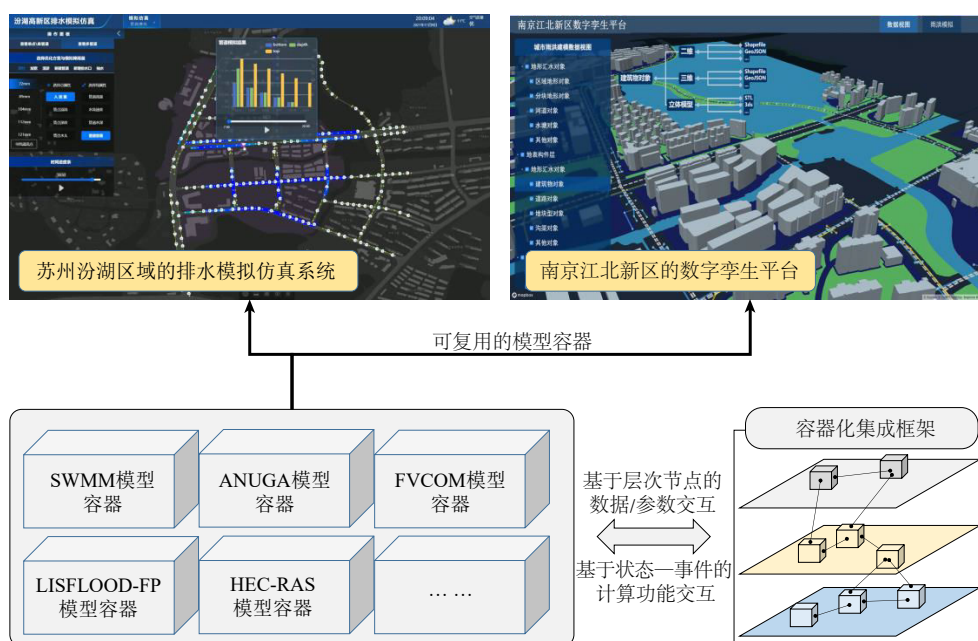


图4 基于模型容器的城市雨洪模拟案例

Fig. 4 Urban flooding simulation case based on model container

如上所述,针对具体区域的建模成果能够按照实例的方式在模型容器中积累,从而为不同应用、按照统一的接口提供数据和计算功能。模型实例的构建不是将模型运行的结果拷贝、转储到容器中,而是在模型容器中进行数据配置、参数设置、结果优化等操作,实现在模型容器中创建、积累、复用模型实例。模型计算依赖的数据和参数通过前述层次节点与脚本扩展的方式进行组织,外部应用的数据绑定到模型数据/参数的节点上;如果数据结构或组织方式存在不兼容,则在层次节点上配置相应的处理脚本来实现数据的定制映射。数据/参数的层次节点实际上构造了一个树状的文档对象模型 DOM (Document Object Model),通过节点上的脚本积累,提升模型与各种异构数据源的兼容性。

如图 5 所示,为了能够尽可能完整表达城市雨洪过程并提高模拟结果精度,本实验集成了

SWMM 模型和 LISFLOOD-FP 模型,从而将管网排水水过程和地表积水过程进行耦合,实现一维管网和二维坡面的集成模拟。基于模型容器的数据对接通道和功能对接通道,多模型之间的集成主要是将数据/参数交换绑定到层次节点上(在层次节点上扩展脚本实现数据/参数的格式转换和内容处理),多模型之间的功能耦合是通过状态切换和事件响应的方式来实现。基于此策略,本实验对 SWMM 和 LISFLOOD-FP 模型开展了配置式的集成,实现了 SWMM 模型中计算管网排水功能和 LISFLOOD-FP 模型中计算坡面漫流功能的互补。在图 5 中,SWMM 模型的管点溢水结果、LISFLOOD-FP 模型(不考虑管网排水)的地表积水结果,以及两者耦合的结果都可以通过模型容器进行调用计算,并形成可在不同区域和应用平台中复用的解决方案。

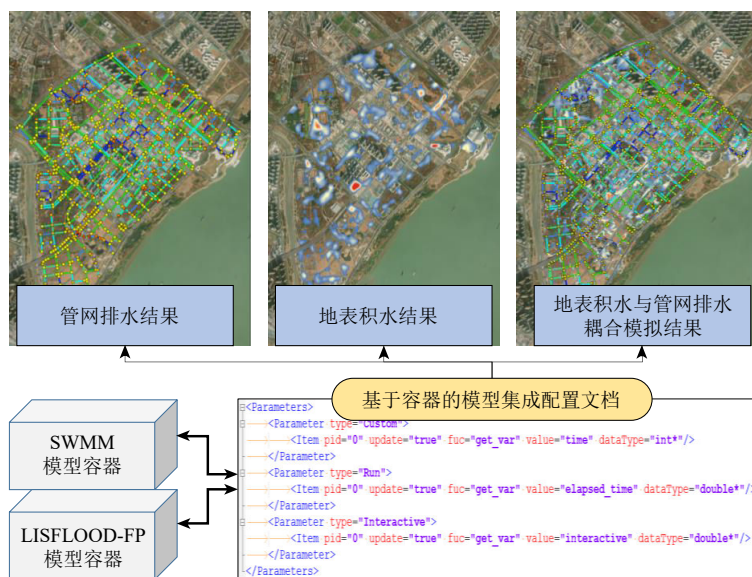


图 5 基于模型容器的配置式集成

Fig. 5 Configurable mode integration based on model containers

4 结 语

论文围绕地理学研究越来越朝着综合集成的研究趋势,针对地理分析模型的集成应用方法进行了系统性的进展梳理。近年来国内外学者在各领域内的地理模型构建、发展和应用方面取得了多元的进展,通过多模型集成来解决复杂地理问题已经成为广泛认可的研究途径,自然—人文相结合、融合大数据与深度学习的集成建模也越来越受到关注。受地理建模工作的专业性和领域性

影响,不同的地理模型在地理认知和功能结构方面往往存在明显的异构性特征。当前模型集成研究对于这种异构性的处理往往是以研究个案为中心,形成面向特定研究区域、具体模型的集成成果,事实上缺乏一种能够适用于多源异构模型的、可定制配置的集成方法。信息服务领域的容器化、微服务等理念,为地理分析模型的集成提供了新的契机和思路。基于容器来持续积累和提升模型的集成能力,有望在模型构建、模型改造、模型集成之间形成有效的桥梁,促进地理模型从实验

工具朝着社会服务的基础设施迈进。通过地理分析模型的集成工作,能够为各种数字孪生的地理场景(如孪生城市、孪生流域、孪生水利等)提供决策分析、方案模拟、预案定制的能力,并驱动数字孪生、元宇宙、数字人等技术跨越视觉体验和运维管理,融合地理知识、提升交互功能、增强综合理解。

通过对地理分析模型在认知表达和功能计算两个主要方面的异构性特征梳理,论文提供了“地理分析模型容器”的设计理念和实现方法。通过构建柔性装配结构的数据对接通道,实现了地理分析模型与异构数据资源之间的适配;通过构建基于事件响应机制的功能对接通道,实现了地理分析模型与多样化交互逻辑之间的适配。通过 Docker 和 Web 服务架构,融合了单机式、集群式和分布式的计算框架,实现地理分析模型的服务化部署和应用。以开放式地理建模与模拟 OpenGMS 平台的构建为牵引,对地理分析模型容器的有效性和实用性展开了验证。总体上,地理分析模型的集成应用需要朝着服务大众、服务业务、服务决策的方向发展,尤其需要与当前发展火热的数字孪生、元宇宙、生成式人工智能等结合,共同推动地球的可持续发展。此项研究未来的工作还包括:如何将模型相关的工具、知识、参数等融合到数字孪生、元宇宙等业务应用系统中,如何在需要多人协作的复杂问题求解过程中提供模型资源、如何在泛在的社会大数据与科学计算模型之间构建有效的互补机制。

参考文献(References)

- Bao Q, Lin P F, Zhou T J, Liu Y M, Yu Y Q, Wu G X, He B, He J, Li L J, Li J D, Li Y C, Liu H L, Qiao F L, Song Z Y, Wang B, Wang J, Wang P F, Wang X C, Wang Z Z, Wu B, Wu T W, Xu Y F, Yu H Y, Zhao W, Zheng W P and Zhou L J. 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2: FGOALS-s2. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(3): 561-576 [DOI: 10.1007/s00376-012-2113-9]
- Batty M. 1997. Virtual geography. *Futures*, 29(4/5): 337-352 [DOI: 10.1016/S0016-3287(97)00018-9]
- Batty M. 2018. Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5): 817-820 [DOI: 10.1177/2399808318796416]
- Binkowski F S and Roselle S J. 2003. Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D6): 4183 [DOI: 10.1029/2001JD001409]
- Birant D and Kut A. 2007. ST-DBSCAN: an algorithm for clustering spatial-temporal data. *Data and Knowledge Engineering*, 60(1): 208-221 [DOI: 10.1016/j.datak.2006.01.013]
- Brunsdon C, Fotheringham S and Charlton M. 1998. Geographically weighted regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(3): 431-443 [DOI: 10.1111/1467-9884.00145]
- Bu X Q, Yue P, Zhang M D and Wang L N. 2016. A geoscientific workflow scripting approach for integration of distributed multiple source geoprocessing packages. *Science of Surveying and Mapping*, 41(10): 159-164 (卜晓倩, 乐鹏, 张明达, 汪林楠. 2016. 分布式多源处理集成的地学工作流脚本方法. *测绘科学*, 41(10): 159-164) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2016.10.032]
- Chassin T, Ingensand J, Christophe S and Touya G. 2022. Experiencing virtual geographic environment in urban 3D participatory e-planning: a user perspective. *Landscape and Urban Planning*, 224: 104432 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104432]
- Chen C S, Liu H D and Beardsley R C. 2003. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1): 159-186 [DOI: 10.1175/1520-0426(2003)020<0159:AUGFVT>2.0.CO;2]
- Chen M, Lü G N, Zhou C H, Lin H, Ma Z Y, Yue S S, Wen Y N, Zhang F Y, Wang J, Zhu Z Y, Xu K and He Y Q. 2021. Geographic modeling and simulation systems for geographic research in the new era: some thoughts on their development and construction. *Science China Earth Sciences*, 64(8): 1207-1223 (陈旻, 闫国年, 周成虎, 林琰, 马载阳, 乐松山, 温永宁, 张丰源, 王进, 朱之一, 许凯, 何元庆. 2021. 面向新时代地理学特征研究的地理建模与模拟系统发展及构建思考. *中国科学: 地球科学*, 51(10): 1664-1680) [DOI: 10.1360/SSTe-2020-0264]
- Chen M, Yue S S, Lü G N, Lin H, Yang C W, Wen Y N, Hou T, Xiao D W and Jiang H. 2019. Teamwork-oriented integrated modeling method for geo-problem solving. *Environmental Modelling and Software*, 119: 111-123 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.05.015]
- Chen Y Y, Gan S, Tian Y D and Zhou X B. 2015. GIS spatial modeling in mountainous land evaluation. *Remote Sensing for Natural Resources*, 27(2): 196-200 (陈应跃, 甘淑, 田禹东, 周曦冰. 2015. 山区土地评价的 GIS 空间分析建模研究. *国土资源遥感*, 27(2): 196-200) [DOI: 10.6046/gtzyyg.2015.02.30]
- Cheng C X, Zhou C H and Lu F. 2003. The improved base state with amendments spatio-temporal model in the object-relation GIS. *Journal of Image and Graphics*, 8(6): 697-702 (程昌秀, 周成虎, 陆锋. 2003. 对象关系型 GIS 中改进基态修正时空数据模型的实现. *中国图象图形学报*, 8(6): 697-702) [DOI: 10.11834/jig.200306233]
- Cheng G D, Xiao H L, Fu B J, Xiao D N, Zheng C M, Kang S Z, Yan X D, Wang Y, An L Z, Li X B, Chen Y Y, Leng S Y, Wang Y H,

- Yang D W, Li X Y, Zhang G L, Zheng Y R, Liu Q H and Zou S B. 2014. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin. *Advances in Earth Science*, 29(4): 431-437 (程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 肖笃宁, 郑春苗, 康绍忠, 延晓冬, 王毅, 安黎哲, 李秀彬, 陈宜瑜, 冷疏影, 王彦辉, 杨大文, 李小雁, 张甘霖, 郑元润, 柳钦火, 邹松兵. 2014. 黑河流域生态—水文过程集成研究进展. *地球科学进展*, 29(4): 431-437 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.04.0431])
- Choi E S, Lavier L and Gurnis M. 2008. Thermomechanics of mid-ocean ridge segmentation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1/4): 374-386 [DOI: 10.1016/j.pepi.2008.08.010]
- Collins D B G, Bras R L and Tucker G E. 2004. Modeling the effects of vegetation-erosion coupling on landscape evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 109(F3): F03004 [DOI: 10.1029/2003JF000028]
- Coon E T and Shuai P. 2022. Watershed Workflow: a toolset for parameterizing data-intensive, integrated hydrologic models. *Environmental Modelling and Software*, 157: 105502 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105502]
- Cova T J and Goodchild M F. 2002. Extending geographical representation to include fields of spatial objects. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(6): 509-532 [DOI: 10.1080/13658810210137040]
- Cui X H, Xie J F, Zhang F, Ding L, Li Z S, Hao Z H, Liu Y and Zhao Q C. 2017. Establishment of PM2.5 forecasting model based on deep learning. *Beijing Surveying and Mapping*, (6): 22-27 (崔相辉, 谢剑锋, 张丰, 丁琳, 李增顺, 郝震寰, 刘勇, 赵起超. 2017. 基于深度学习的PM2.5预测模型建立. *北京测绘*, (6): 22-27 [DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2017.06.006])
- David O, Ascough J C II, Lloyd W, Green T R, Rojas K W, Leavesley G H and Ahuja L R. 2013. A software engineering perspective on environmental modeling framework design: the object modeling system. *Environmental Modelling and Software*, 39: 201-213 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.03.006]
- Davis C, Wang W, Chen S S, Chen Y S, Corbosiero K, DeMaria M, Dudhia J, Holland G, Klemp J, Michalakes J, Reeves H, Rotunno R, Snyder C and Xiao Q N. 2008. Prediction of landfalling hurricanes with the advanced hurricane WRF model. *Monthly Weather Review*, 136(6): 1990-2005 [DOI: 10.1175/2007MWR2085.1]
- Di L P. 2004. GeoBrain-A web services based geospatial knowledge building system//Paper presented at the NASA Earth Science Technology Conference. Palo Alto
- Douglas-Mankin K R, Srinivasan R and Arnold J G. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5): 1423-1431 [DOI: 10.13031/2013.34915]
- Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, Canadell J, Canfield D, Elser J, Gruber N, Hibbard K, Höglberg P, Linder S, Mackenzie F T, Moore B III, Pedersen T, Rosenthal Y, Seitzinger S, Smetacek V and Steffen W. 2000. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290(5490): 291-296 [DOI: 10.1126/science.290.5490.291]
- Fan J. 2018. "Territorial System of Human-environment Interaction": a theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern. *Acta Geographica Sinica*, 73(4): 597-607 (樊杰. 2018. "人地关系地域系统"是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石. *地理学报*, 73(4): 597-607 [DOI: 10.11821/dlxb201804001])
- Fang W J. 2017. Urban Road Traffic Noise Prediction Based on RLS90 and Traffic Flow Factors Analysis. Xi'an: Chang'an University (方文杰. 2017. 基于RLS90的城市道路交通噪声预测及交通流影响因子分析. 西安: 长安大学)
- Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S and Haxeltine A. 1996. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4): 603-628 [DOI: 10.1029/96GB02692]
- Fu B J. 2018. Thoughts on the recent development of physical geography. *Progress in Geography*, 37(1): 1-7 (傅伯杰. 2018. 新时代自然地理学发展的思考. *地理科学进展*, 37(1): 1-7 [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.001])
- Fu Z Y, Xu R Z and Liu W Q. 2016. Research on terrorist attack warning model based on Bayesian network. *Journal of Catastrophology*, 31(3): 184-189 (傅子洋, 徐荣贞, 刘文强. 2016. 基于贝叶斯网络的恐怖袭击预警模型研究. *灾害学*, 31(3): 184-189 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.03.031])
- Gong J H, Li W H, Zhang G Y, Shen S, Huang L and Sun J. 2018. An augmented geographic environment for geo-process visualization—a case of crowd evacuation simulation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(8): 1089-1097 (龚建华, 李文航, 张国永, 申申, 黄琳, 孙廩. 2018. 增强地理环境中过程可视化方法——以人群疏散模拟为例. *测绘学报*, 47(8): 1089-1097 [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180111])
- Gong J H, Zhou J P and Zhang L H. 2010. Study progress and theoretical framework of virtual geographic environments. *Advances in Earth Science*, 25(9): 915-926 (龚建华, 周洁萍, 张利辉. 2010. 虚拟地理环境研究进展与理论框架. *地球科学进展*, 25(9): 915-926 [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2010.09.0915])
- Gong J Y. 1997. An object oriented spatio temporal data model in GIS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 26(4): 289-298 (龚健雅. 1997. GIS中面向对象时空数据模型. *测绘学报*, 26(4): 289-298)
- Goodall J L, Saint K D, Ercan M B, Briley L J, Murphy S, You H H, DeLuca C and Rood R B. 2013. Coupling climate and hydrological models: interoperability through Web Services. *Environmental Modelling and Software*, 46: 250-259 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.03.019]
- Goodchild M F, Yuan M and Cova T J. 2007. Towards a general theory of geographic representation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(3): 239-260 [DOI: 10.1080/13658810600965271]

- Griffith D A and Peres-Neto P R. 2006. Spatial modeling in ecology: the flexibility of eigenfunction spatial analyses. *Ecology*, 87(10): 2603-2613 [DOI: 10.1890/0012-9658(2006)87[2603:SMIETF]2.0.CO;2]
- Guenther A, Karl T, Harley P, Wiedinmyer C, Palmer P I and Geron C. 2006. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11): 3181-3210 [DOI: 10.5194/acp-6-3181-2006]
- Guo R Z, Lin H J, He B and Zhao Z G. 2020. GIS framework for smart cities. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(12): 1829-1835 (郭仁忠, 林浩嘉, 贺彪, 赵志刚. 2020. 面向智慧城市的GIS框架. 武汉大学学报(信息科学版), 45(12): 1829-1835) [DOI: 10.13203/j.whugis20200536]
- Habtu W and Jayappa K S. 2022. Assessment of soil erosion extent using RUSLE model integrated with GIS and RS: the case of Megech-Dirma watershed, Northwest Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5): 318 [DOI: 10.1007/s10661-022-09965-y]
- Hill C, DeLuca C, Balaji, Suarez M and Da Silva A. 2004. The architecture of the earth system modeling framework. *Computing in Science and Engineering*, 6(1): 18-28 [DOI: 10.1109/MCISE.2004.1255817]
- Huang H S. 2009. Complete integration of GIS with resource and environmental model. *Journal of Computer Applications*, 29(S1): 362-365 (黄宏胜. 2009. 资源环境模型与GIS完全集成. 计算机应用, 29(S1): 362-365)
- Huber W C and Dickinson R E. 1988. Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. Athens: U.S. Environmental Protection Agency
- Hughes J D, Russcher M J, Langevin C D, Morway E D and McDonald R R. 2022. The MODFLOW Application Programming Interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling and Software*, 148: 105257 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105257]
- Johansson L, Karppinen A, Kurppa M, Kousa A, Niemi J V and Kukkonen J. 2022. An operational urban air quality model ENFUSER, based on dispersion modelling and data assimilation. *Environmental Modelling and Software*, 156: 105460 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105460]
- Kim S H, Edmonds J, Lurz J, Smith S J and Wise M. 2006. The ObJECTS framework for integrated assessment: hybrid modeling of transportation. *The Energy Journal*, 27(2S): 63-91 [DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI2-4]
- Korzukhin M D, Ter-Mikaelian M T and Wagner R G. 1996. Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management?. *Canadian Journal of Forest Research*, 26(5): 879-887 [DOI: 10.1139/x26-096]
- Langran G. 1992. Time in Geographic Information Systems. London: CRC Press [DOI: 10.1201/9781003062592]
- Li D, Liu X P, Luo Y and Wang Y F. 2016. Sensitivity analysis of the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) in simulating urban expansion dynamic using cellular automata. *Geography and Geo-Information Science*, 32(5): 14-21 (李丹, 刘小平, 罗勇, 王云飞. 2016. MAUP效应在城市扩张元胞自动机模拟中的敏感性分析. 地理与地理信息科学, 32(5): 14-21) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2016.05.003]
- Li D R, Gong J Y and Bian F L. 1994. Data organization and processing methods of GIS. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (1): 28-37 (李德仁, 龚健雅, 边馥菱. 1994. GIS的数据组织与处理方法. 测绘通报, (1): 28-37)
- Li L H, Lei B B and Mao C L. 2022. Digital twin in smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 26: 100289 [DOI: 10.1016/j.jii.2021.100289]
- Li L J, Lin P F, Yu Y Q, Wang B, Zhou T J, Liu L, Liu J P, Bao Q, Xu S M, Huang W Y, Xia K, Pu Y, Dong L, Shen S, Liu Y M, Hu N, Liu M M, Sun W Q, Shi X J, Zheng W P, Wu B, Song M R, Liu H L, Zhang X H, Wu G X, Xue W, Huang X M, Yang G W, Song Z Y and Qiao F L. 2013. The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(3): 543-560 [DOI: 10.1007/s00376-012-2140-6]
- Li Q Q and Li D R. 2014. Big data GIS. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(6): 641-644, 666 (李清泉, 李德仁. 2014. 大数据GIS. 武汉大学学报(信息科学版), 39(6): 641-644, 666) [DOI: 10.13203/j.whugis20140150]
- Li S C, Zhang W B, Chen L Y, Liang Z, Zhang Y J and Wang Z. 2022. Digital twin space and its applications: concurrent discussion on the space reconstruction of geographical research. *Acta Geographica Sinica*, 77(3): 507-517 (李双成, 张文彬, 陈立英, 梁泽, 张雅娟, 王铮. 2022. 孪生空间及其应用——兼论地理研究空间的重构. 地理学报, 77(3): 507-517) [DOI: 10.11821/dlxb202203001]
- Li X, Yang Q S and Liu X P. 2007. Knowledge mining and planning scenario simulation of urban evolution based on CA. *Scientia Sinica (Terrae)*, 37(9): 1242-1251 (黎夏, 杨青生, 刘小平. 2007. 基于CA的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟. 中国科学D辑: 地球科学, 37(9): 1242-1251) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7240.2007.09.012]
- Li X L and Yin H. 2019. Research on event-level space-time model for government text data. *Jiangxi Science*, 37(6): 958-963, 988 (李小龙, 尹涵. 2019. 面向政务文本数据的事件级时空模型研究. 江西科学, 37(6): 958-963, 988) [DOI: 10.13990/j.issn1001-3679.2019.06.028]
- Li Y L, Zhang Q, Yao J and Li X H. 2013. Integrated simulation of hydrological and hydrodynamic processes for Lake Poyang catchment system. *Journal of Lake Sciences*, 25(2): 227-235 (李云良, 张奇, 姚静, 李相虎. 2013. 鄱阳湖湖泊流域系统水文水动力联合模拟. 湖泊科学, 25(2): 227-235) [DOI: 10.18307/2013.0208]
- Lin H, Chen M, Lu G N, Zhu Q, Gong J H, You X, Wen Y N, Xu B L and Hu M Y. 2013. Virtual Geographic Environments (VGEs): a

- new generation of geographic analysis tool. *Earth-Science Reviews*, 126: 74-84 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.08.001]
- Lin H, Hu M Y, Chen M, Zhang F, You L and Chen Y T. 2020. Cognitive transformation from geographic information system to virtual geographic environments. *Journal of Geo-Information Science*, 22(4): 662-672 (林珏, 胡明远, 陈旻, 张帆, 游兰, 陈宇婷. 2020. 从地理信息系统到虚拟地理环境的认知转变. *地球信息科学学报*, 22(4): 662-672) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200048]
- Lin H, Xu B L, Chen Y T, Jing Q and You L. 2022. The virtual geographic environments: more than the digital twin of the physical geographical environments//Li B, Shi X, Zhu A X, Wang C Z and Lin H, eds. *New Thinking in GIScience*. Singapore: Springer: 17-28 [DOI: 10.1007/978-981-19-3816-0_3]
- Lin Y L, Huang X M, Liang Y S, Qin Y, Xu S M, Huang W Y, Xu F H, Liu L, Wang Y, Peng Y R, Wang L N, Xue W, Fu H H, Zhang G J, Wang B, Li R Z, Zhang C, Lu H, Yang K, Luo Y, Bai Y Q, Song Z Y, Wang M Q, Zhao W J, Zhang F, Xu J H, Zhao X, Lu C S, Luo Y Q, Chen Y Z, Hu Y, Tang Q, Chen D X, Yang G W and Gong P. 2019. The Community Integrated Earth System Model (CIESM) from Tsinghua University and its plan for CMIP6 experiments. *Climate Change Research*, 15(5): 545-550 (林岩鑫, 黄小猛, 梁逸爽, 秦怡, 徐世明, 黄文誉, 徐芳华, 刘利, 王勇, 彭怡然, 王兰宇, 薛巍, 付昊桓, 张广俊, 王斌, 李锐喆, 张诚, 卢麾, 阳坤, 罗勇, 白玉琪, 宋振亚, 王敏琦, 赵文婕, 张峰, 徐敬衡, 赵曦, 陆春松, 骆亦其, 陈奕兆, 胡勇, 唐强, 陈德训, 杨广文, 宫鹏. 2019. 清华大学 CIESM 模式及其参与 CMIP6 的方案. *气候变化研究进展*, 15(5): 545-550) [DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.166]
- Liu C Z, Chao Q C, Wang S R and Liu Z Y. 2023. The research progress of hydrologic cycle in hydrometeorology. *Climate Change Research*, 19(1): 1-10 (刘春泰, 巢清尘, 王守荣, 刘志雨. 2023. 水文气象学领域的水文循环研究进展. *气候变化研究进展*, 19(1): 1-10) [DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2022.174]
- Liu H M, Fang C L, Li Y H. 2019. The Coupled Human and Natural Cube: A conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions. *Acta Geographica Sinica*, 74(8): 1489-1507 (刘海猛, 方创琳, 李咏红. 2019. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J]. *地理学报*, 74(8): 1489-1507) [DOI:10.11821/dlxb201908001]
- Liu L, Ji J K, Song G W, Liao W W, Yu H J and Liu W J. 2019. Hot-spot prediction of public property crime based on spatial differentiation of crime and built environment. *Journal of Geo-Information Science*, 21(11): 1655-1668 (柳林, 纪佳楷, 宋广文, 廖薇薇, 余洪杰, 刘文娟. 2019. 基于犯罪空间分异和建成环境的公共场所侵财犯罪热点预测. *地球信息科学学报*, 21(11): 1655-1668) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2019.190358]
- Liu R Y and Liu N. 2002. A study on spatio-temporal process and storage in dynamic land management system. *Journal of Image and Graphics*, 7(4): 388-393 (刘仁义, 刘南. 2002. 动态土地信息系统时空过程及时空数据存储. *中国图象图形学报*, 7(4): 388-393) [DOI: 10.11834/jig.200204129]
- Liu W, Yang C Y, Li Y D and Shi X K. 2018. The development and application of the WRF-POM regional air-sea coupled model based on the MCT coupler. *Marine Sciences*, 42(5): 98-107 (刘武, 杨成荫, 李耀东, 史小康. 2018. 基于 MCT 耦合器的 WRF-POM 区域海气耦合模式构建及应用. *海洋科学*, 42(5): 98-107) [DOI: 10.11759/hyxx20171014001]
- Liu X Y. 2010. Implementation of sea ice-ocean coupled model in form of coupler component. *Computer Engineering and Applications*, 46(1): 24-27 (刘喜迎. 2010. 采用耦合器组件的区域冰—洋耦合模式的实现. *计算机工程与应用*, 46(1): 24-27) [DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.01.008]
- Liu Y, Goodchild M F, Guo Q H, Tian Y P and Wu L. 2008. Towards a general field model and its order in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(6): 623-643 [DOI: 10.1080/13658810701587727]
- Liu Y, Kang C G and Wang F H. 2014. Towards big data-driven human mobility patterns and models. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(6): 660-666 (刘瑜, 康朝贵, 王法辉. 2014. 大数据驱动的人类移动模式和模型研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 39(6): 660-666) [DOI: 10.13203/j.whugis20140149]
- Liu Y F, Lu B B, Zhang Y B and Liu T. 2009. Modeling the dynamic evolvement of road networks based on object version management methods. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(3): 488-494 (刘岳峰, 卢宾宾, 张伊波, 刘婷. 2009. 基于对象版本管理方法的道路网络动态演变建模研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 45(3): 488-494) [DOI: 10.13209/j.0479-8023.2009.073]
- Lu D D. 2015. The value of geographical science and the feelings of geographers. *Acta Geographica Sinica*, 70(10): 1539-1551 (陆大道. 2015. 地理科学的价值与地理学者的情怀. *地理学报*, 70(10): 1539-1551) [DOI: 10.11821/dlxb201510001]
- Lu Y L, Li J W, Ye S X, Jiang J W, Yin M and Zhou Y L. 2018. Big data organization method of GIS spatio-temporal expanded the streaming data cube. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (8): 115-118 (陆妍玲, 李景文, 叶苏娴, 姜建武, 殷敏, 周艳柳. 2018. 扩展流数据立方体的 GIS 时空大数据组织方法. *测绘通报*, (8): 115-118) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0257]
- Lü G N. 2011. Geographic analysis-oriented Virtual Geographic Environment: framework, structure and functions. *Science China Earth Sciences*, 54(5): 733-743 (阚国年. 2011. 地理分析导向的虚拟地理环境: 框架、结构与功能. *中国科学: 地球科学*, 41(4): 549-561) [DOI: 10.1360/zd-2011-41-4-549]
- Lü G N, Chen M, Yuan L W, Zhou L C, Wen Y N, Wu M G, Hu B, Yu Z Y, Yue S S and Sheng Y H. 2018. Geographic scenario: a possible foundation for further development of virtual geographic environments. *International Journal of Digital Earth*, 11(4): 356-368 [DOI: 10.1080/17538947.2017.1374477]
- Lü G N, Yuan L W and Yu Z Y. 2022. Information geography: a new fulcrum of geographic ternary world. *Science China Earth Sciences*, 65(2): 383-386 (阚国年, 袁林旺, 俞肇元. 2022. 信息地理学:

- 地理三元世界的新支点. 中国科学: 地球科学, 52(2): 374-376 [DOI: 10.1360/SSTe-2021-0051]
- Lü G N, Zhou C H, Lin H, Chen M, Yue S S and Wen Y N. 2021. Development overview and some thoughts on geographic synthesis. Chinese Science Bulletin, 66(20): 2542-2554 (闰国年, 周成虎, 林琿, 陈旻, 乐松山, 温永宁. 2021. 地理综合研究方法的发展与思考. 科学通报, 66(20): 2542-2554) [DOI: 10.1360/TB-2020-0799]
- Mei C G, Yu L H, Ni K J, Chen X and Que J J. 2023. Development and application of “four pre” flood control system for Zhougongzhai Reservoir based on digital twin. Water Resources Information, 1: 23-28, 32 (梅传贵, 余丽华, 倪凯军, 陈翔, 阙家骏. 2023. 基于数字孪生的周公宅水库防洪“四预”系统构建与应用. 水利信息化, (1): 23-28, 32) [DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.01.005]
- Mishra A K, Kumar P, Dubey A K, Tiwari G and Sein D V. 2022. Impact of air – sea coupling on the simulation of Indian summer monsoon using a high-resolution Regional Earth System Model over CORDEX-SA. Climate Dynamics, 59(9/10): 3013-3033 [DOI: 10.1007/s00382-022-06249-6]
- Moore R V and Tindall C I. 2005. An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). Environmental Science and Policy, 8(3): 279-286 [DOI: 10.1016/j.envsci.2005.03.009]
- Nixon V and Hornsby K S. 2010. Using geolifespans to model dynamic geographic domains. International Journal of Geographical Information Science, 24(9): 1289-1308 [DOI: 10.1080/13658811003601448]
- Olasz A, Thai B N and Kristóf D. 2016. A new initiative for tiling, stitching and processing geospatial big data in distributed computing environments. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, III-4: 111-118 [DOI: 10.5194/isprs-annals-III-4-111-2016]
- Omran H, Parmentier B, Helbich M and Pijanowski B. 2019. The land transformation model-cluster framework: applying k-means and the Spark computing environment for large scale land change analytics. Environmental Modelling and Software, 111: 182-191 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.10.004]
- Peckham S D, Hutton E W H and Norris B. 2013. A component-based approach to integrated modeling in the geosciences: the design of CSDMS. Computers and Geosciences, 53: 3-12 [DOI: 10.1016/j.cageo.2012.04.002]
- Pei T, Huang Q, Wang X, Chen X, Liu Y X, Song C, Chen J and Zhou C H. 2021. Big geodata aggregation: connotation, classification, and framework. National Remote Sensing Bulletin, 25(11): 2153-2162 (裴韬, 黄强, 王席, 陈晓, 刘亚溪, 宋辞, 陈洁, 周成虎. 2021. 地理大数据聚合的内涵、分类与框架. 遥感学报, 25(11): 2153-2162) [DOI: 10.11834/jrs.20210480]
- Qi J H, Chen C S and Beardsley R C. 2018. FVCOM one-way and two-way nesting using ESMF: development and validation. Ocean Modelling, 124: 94-110 [DOI: 10.1016/j.ocemod.2018.02.007]
- Rashidi P, Wang T J, Skidmore A, Vrieling A, Darvishzadeh R, Toxopeus B, Ngene S and Omondi P. 2015. Spatial and spatiotemporal clustering methods for detecting elephant poaching hotspots. Ecological Modelling, 297: 180-186 [DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.11.017]
- Rasp S, Pritchard M S and Gentile P. 2018. Deep learning to represent subgrid processes in climate models. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(39): 9684-9689 [DOI: 10.1073/pnas.1810286115]
- Reitsma F and Albrecht J. 2005. Implementing a new data model for simulating processes. International Journal of Geographical Information Science, 19(10): 1073-1090 [DOI: 10.1080/13658810500390943]
- Rink K, Nixdorf E, Zhou C Z, Hillmann M and Bilke L. 2020. A virtual geographic environment for multi-compartment water and solute dynamics in large catchments. Journal of Hydrology, 582: 124507 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124507]
- Roberts J J, Best B D, Dunn D C, Treml E A and Halpin P N. 2010. Marine Geospatial Ecology Tools: an integrated framework for ecological geoprocessing with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and C++. Environmental Modelling and Software, 25(10): 1197-1207 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.03.029]
- Roth D, Otterstatter M, Wong J, Cook V, Johnston J and Mak S. 2016. Identification of spatial and cohort clustering of tuberculosis using surveillance data from British Columbia, Canada, 1990-2013. Social Science and Medicine, 168: 214-222 [DOI: 10.1016/j.socscimed.2016.06.047]
- Rousseau A N, Mailhot A, Turcotte R, Duchemin M, Blanchette C, Roux M, Etong N, Dupont J and Villeneuve J P. 2000. GIBSI – An integrated modelling system prototype for river basin management. Hydrobiologia, 422(2000): 465-475 [DOI: 10.1023/A:1017030618572]
- Running S W and Hunt E R. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models//Ehleringer J R and Field C B, eds. Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. San Diego: Academic Press: 141-158 [DOI: 10.1016/B978-0-12-233440-5.50014-2]
- Shangguan B Y, Yue P, Yan Z R and Tapete D. 2019. A stream computing approach for live environmental models using a spatial data infrastructure with a waterlogging model case study. Environmental Modelling and Software, 119: 182-196 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.06.009]
- Shi S L, Pang B, Zhao G, Chi K G and Ren M F. 2019. Urban storm-water simulation based on recognition of effective impervious area. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 55(5): 595-602 (石树兰, 庞博, 赵刚, 迟凯歌, 任梅芳. 2019. 基于有效不透水面识别的城市雨洪过程模拟研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 55(5): 595-602) [DOI: 10.16360/j.cnki.jbnnu.2019.05.007]
- Shrestha N K, Leta O T, De Fraine B, van Griensven A and Bauwens W. 2013. OpenMI-based integrated sediment transport modelling of the river Zenne, Belgium. Environmental Modelling and Software, 47: 193-206 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.05.004]
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Ka-

- plan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K and Venevsky S. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9(2): 161-185 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x]
- Song C Q. 2016. On paradigms of geographical research. *Progress in Geography*, 35(1): 1-3 (宋长青. 2016. 地理学研究范式的思考. 地理科学进展, 35(1): 1-3) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.01.001]
- Song C Q, Cheng C X and Shi P J. 2018. Geography complexity: new connotations of geography in the new era. *Acta Geographica Sinica*, 73(7): 1204-1213 (宋长青, 程昌秀, 史培军. 2018. 新时代地理复杂性的内涵. 地理学报, 73(7): 1204-1213) [DOI: 10.11821/dlxb201807002]
- Song C Q, Cheng C X, Yang X F, Ye S J and Gao P C. 2020. Understanding geographic coupling and achieving geographic integration. *Acta Geographica Sinica*, 75(1): 3-13 (宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 叶思菁, 高培超. 2020. 理解地理“耦合”实现地理“集成”. 地理学报, 75(1): 3-13) [DOI: 10.11821/dlxb202001001]
- Song X D, Zhang G L, Liu F, Li D C, Zhao Y G and Yang J L. 2016. Modeling spatio-temporal distribution of soil moisture by deep learning-based cellular automata model. *Journal of Arid Land*, 8(5): 734-748 [DOI: 10.1007/s40333-016-0049-0]
- Song Z Y, Bao Y and Qiao F L. 2022. Global carbon cycle of earth system model FIO-ESM. *Advances in Marine Science*, 40(4): 777-790 (宋振亚, 鲍颖, 乔方利. 2022. 两代耦合海浪的地球系统模式 FIO-ESM 全球碳循环过程发展. 海洋科学进展, 40(4): 777-790) [DOI: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220628001]
- Sui D Z and Maggio R C. 1999. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(1): 33-51 [DOI: 10.1016/s0198-9715(98)00052-0]
- Sun Q and Tang F H. 2015. The comparison of city housing price spatial variances based on spatial expansion and geographical weighted regression models. *Geographical Research*, 34(7): 1343-1351 (孙倩, 汤放华. 2015. 基于空间扩展模型和地理加权回归模型的城市住房价格空间分异比较. 地理研究, 34(7): 1343-1351) [DOI: 10.11821/dlxyj201507013]
- Swain N R, Christensen S D, Snow A D, Dolder H, Espinoza-Dávalos G, Goharian E, Jones N L, Nelson E J, Ames D P and Burian S J. 2016. A new open source platform for lowering the barrier for environmental web app development. *Environmental Modelling and Software*, 85: 11-26 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.08.003]
- Tan X C, Jiao J G, Chen N C, Huang F, Di L P, Wang J C, Sha Z Y and Liu J. 2021. Geoscience model service integrated workflow for rainstorm waterlogging analysis. *International Journal of Digital Earth*, 14(7): 851-873 [DOI: 10.1080/17538947.2021.1898686]
- Tan X C, Jiao J G, Zhong Y F, Ma A L, Xu Y Y, Sha Z Y, Huang F, Wan Y T and Hu W Z. 2022. The CNRIEEEMC: a communication-navigation-remote sensing-integrated ecological environment emergency monitoring chain for tailings areas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108: 102710 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102710]
- Tang L Y, Peng X M, Chen C C, Huang H Y and Lin D. 2019. Three-dimensional Forest growth simulation in virtual geographic environments. *Earth Science Informatics*, 12(1): 31-41 [DOI: 10.1007/s12145-018-0356-4]
- Tao F, Zhang M, Cheng J F and Qi Q L. 2017. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 23(1): 1-9 (陶飞, 张萌, 程江峰, 戚庆林. 2017. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式. 计算机集成制造系统, 23(1): 1-9) [DOI: 10.13196/j.cims.2017.01.001]
- Tarboton D G, Ames D P, Horsburgh J S, Goodall J L, Couch A, Hooper R, Bales J, Wang S, Castronova A, Seul M and Idaszak R. 2023. HydroShare retrospective: Science and technology advances of a comprehensive data and model publication environment for the water science domain. *Environmental Modelling & Software*, p.105902 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2023.105902]
- Tong S L, Wang W G, Chen J, Xu C Y, Sato H and Wang G Q. 2022. Impact of changes in climate and CO₂ on the carbon storage potential of vegetation under limited water availability using SEIB-DGVM version 3.02. *Geoscientific Model Development*, 15(18): 7075-7098 [DOI: 10.5194/gmd-15-7075-2022]
- Trotter L, Knoben W J M, Fowler K J A, Saft M and Peel M C. 2022. Modular Assessment of Rainfall – Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v2.1: an object-oriented implementation of 47 established hydrological models for improved speed and readability. *Geoscientific Model Development*, 15(16): 6359-6369 [DOI: 10.5194/gmd-15-6359-2022]
- Tucker G, Lancaster S, Gasparini N and Bras R. 2001. The channel-hillslope integrated landscape development model (*CHILD*). Harmon R S and Doe W W, eds. *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. New York: Springer: 349-388 [DOI: 10.1007/978-1-4615-0575-4_12]
- Tucker G E and Hancock G R. 2010. Modelling landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(1): 28-50 [DOI: 10.1002/esp.1952]
- Tufa A, Boicu I, Filip I D, Negru C and Pop F. 2018. Remote sensing computing model for forest monitoring in cloud//2018 IEEE 16th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). Bucharest: IEEE: 138-144 [DOI: 10.1109/EUC.2018.00028]
- Voinov A, Çöltekin A, Chen M and Beydoun G. 2018. Virtual geographic environments in socio-environmental modeling: a fancy distraction or a key to communication?. *International Journal of Digital Earth*, 11(4): 408-419 [DOI: 10.1080/17538947.2017.1365961]
- Wang B, Zhang M D, Huang Q J and Yue P. 2021. A container-based service publishing method for heterogeneous geoprocessing operators. *Journal of Geomatics*, 46(S1): 174-177 (王博, 张明达, 黄秋钧, 乐鹏. 2021. 基于容器的异构空间信息处理算子服务发布方

- 法. 测绘地理信息, 46(S1): 174-177 [DOI: 10.14188/j.2095-6045.2020314]
- Wang J F and Xu C D. 2017. Geodetector: principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134 (王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 72(1): 116-134) [DOI: 10.11821/dlxb201701010]
- Wang S, Xuan Y Y, Zhang J, Wu H L and Wu P. 2023. The real scene modeling technology application in the power grid digital twinning system. *Electric Power Survey and Design*, (2): 78-82 (王朔, 轩莹莹, 张骥, 吴海亮, 吴鹏. 2023. 实景建模技术在电网数字孪生系统中的应用分析. *电力勘测设计*, (2): 78-82) [DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.02.016]
- Wang S H, Zhong Y and Wang E Q. 2019. An integrated GIS platform architecture for spatiotemporal big data. *Future Generation Computer Systems*, 94: 160-172 [DOI: 10.1016/j.future.2018.10.034]
- Wei M Y, Zhang Z D, Liu Y N and Zhang K L. 2020. Characteristics of soil erosion in Guangxi based on CSLE. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(1): 15-20 (魏梦瑶, 张卓栋, 刘琪娜, 张科利. 2020. 基于CSLE模型的广西土壤侵蚀规律. *水土保持研究*, 27(1): 15-20) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.01.002]
- Wen Y N, Chen M, Lu G N, Lin H, He L and Yue S S. 2013. Prototyping an open environment for sharing geographical analysis models on cloud computing platform. *International Journal of Digital Earth*, 6(4): 356-382 [DOI: 10.1080/17538947.2012.716861]
- Wu H Y, You L, Gui Z P, Hu K and Shen P. 2015. GeoSquare: collaborative geoprocessing models' building, execution and sharing on Azure Cloud. *Annals of GIS*, 21(4): 287-300 [DOI: 10.1080/19475683.2015.1098727]
- Wu L, Ma X J and Tian Y. 2000. Model of field-based spatial dynamic data and design of spatial dynamic modeling language. *Geography and Territorial Research*, 16(4): 73-76, 96 (邬伦, 马修军, 田原. 2000. 基于场模型的空间动态数据建模及空间动态模型语言设计. *地理学与国土研究*, 16(4): 73-76, 96)
- Wu R, Scully-Allison C, Rifat M H, Painumkal J, Dascalu S and Harris F C Jr. 2018. Virtual watershed system: a web-service-based software package for environmental modeling. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 3(5): 382-393 [DOI: 10.25046/aj030544]
- Wu Z F, Chai Y W, Dang A R, Gong J H, Gao S, Yue Y, Li D, Liu L, Liu X J, Liu Y, Long Y, Lu F, Qin C Z, Wang H, Wang P, Wang W and Zhen F. 2015. Geography interact with big data: dialogue and reflection. *Geographical Research*, 34(12): 2207-2221 (吴志峰, 柴彦威, 党安荣, 龚建华, 高松, 乐阳, 李栋, 柳林, 刘行健, 刘瑜, 龙瀛, 陆锋, 秦承志, 王慧, 王鹏, 王伟, 甄峰. 2015. 地理学碰上“大数据”: 热反应与冷思考. *地理研究*, 34(12): 2207-2221) [DOI: 10.11821/dlyj201512001]
- Xiao C W, Zhang M W, Liu H L, Qin B and Huang B. 2022. Analysis of the Metaverse's spatial restructuring. *Geography and Geo-Information Science*, 38(2): 1-9 (肖超伟, 张旻薇, 刘合林, 秦波, 黄波. 2022. “元宇宙”的空间重构分析. *地理与地理信息科学*, 38(2): 1-9) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2022.02.001]
- Xu B L, Lin H, Zhu J and Deng L H. 2009. Construction of a virtual geographic environment for air pollution simulation in Pearl River Delta. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 34(6): 636-640 (徐丙立, 林珏, 朱军, 邓丽华. 2009. 面向珠三角空气污染模拟的虚拟地理环境系统研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 34(6): 636-640) [DOI: 10.13203/j.whugis2009.06.016]
- Xu B L, Rao Y, Chen Y T, You L and Lin H. 2018. Role model-based geo-collaboration of virtual geographic environments. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(10): 1580-1587 (徐丙立, 饶毅, 陈宇婷, 游兰, 林珏. 2018. 使用角色构建虚拟地理环境群体协同方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(10): 1580-1587) [DOI: 10.13203/j.whugis20160499]
- Yan D, Li A N, Nan X, Lei G B and Cao X M. 2016. The study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna-CLUE model and SDM: a case study of the upper reaches of Minjiang River. *Journal of Geo-information Science*, 18(4): 514-525 (严冬, 李爱农, 南希, 雷光斌, 曹小敏. 2016. 基于Dyna-CLUE改进模型和SD模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例. *地球信息科学学报*, 18(4): 514-525) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2016.00514]
- Yan H W. 2012. Development of Integrated Platform for Refined Marine Meteorological Forecasting Data based on the GFS and WW3 Numerical Forecasting Models. Shanghai: East China Normal University (严华雯. 2012. 基于GFS和WW3数值预报模式数据的精细化海洋气象预报集成平台开发. 上海: 华东师范大学)
- Yang T and Shan F. 2022. City Information Model (CIM) construction from a complex system perspective. *Future City Studies*, (10): 8-13 (杨滔, 单峰. 2022. 复杂系统视角下的城市信息模型(CIM)建构. *未来城市设计与运营*, (10): 8-13)
- Ye Y T, Jiang Y Z, Liang L L, Zhao H L, Gu J J, Dong J P, Cao Y and Duan H. 2022. Digital twin watershed: new infrastructure and new paradigm of future watershed governance and management. *Advances in Water Science*, 33(5): 683-704 (冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 赵红莉, 顾晶晶, 董甲平, 曹引, 段浩. 2022. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式. *水科学进展*, 33(5): 683-704) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.05.001]
- Yi J W, Du Y Y, Liang F Y, Zhou C H, Wu D and Mo Y. 2014. A representation framework for studying spatiotemporal changes and interactions of dynamic geographic phenomena. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(5): 1010-1027 [DOI: 10.1080/13658816.2014.890201]
- Yin Z C and Li L. 2005. Research of spatiotemporal indexing mechanism based on snapshot-increment. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 34(3): 257-261, 282 (尹章才, 李霖. 2005. 基于快照-增量的时空索引机制研究. *测绘学报*, 34(3): 257-261, 282)
- Yu D Y, Tang L Y, Ye F and Chen C C. 2021. A virtual geographic environment for dynamic simulation and analysis of tailings dam failure. *International Journal of Digital Earth*, 14(9): 1194-1212

- [DOI: 10.1080/17538947.2021.1945151]
- Yu H C, Zhang Y J, Nerger L, Lemmen C, Yu J C S, Chou T Y, Chu C H and Terng C T. 2022. Development of a flexible data assimilation method in a 3D unstructured-grid ocean model under Earth System Modeling Framework. *EGUsphere*, 1-29 [DOI: 10.5194/egusphere-2022-114]
- Zang Z. 2022. Operation and maintenance technology of air-ground integrated “Digital Twins” based on BIM and GIS for intelligent Beijing--Zhangjiakou high speed railway. *Railway Transport and Economy*, 44(9): 139-145 (臧钊. 2022. 基于BIM+GIS的京张高速铁路空地一体“数字孪生”智能化运维技术研究. *铁道运输与经济*, 44(9): 139-145) [DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2022.09.19]
- Zeng L, Li J, Li T, Yang X N and Wang Y Z. 2018. Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks. *Acta Geographica Sinica*, 73(9): 1809-1822 (曾莉, 李晶, 李婷, 杨晓楠, 王彦泽. 2018. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化. *地理学报*, 73(9): 1809-1822) [DOI: 10.11821/dlxb201809015]
- Zhao Y B, Nan Z T and Zhao J. 2013. A Decision Support System for Watershed Management Supporting Multidiscipline Model Integration. *Remote Sensing Technology and Application*, 28(3): 511-519 (赵彦博, 南卓铜, 赵军. 2013. 一个新的支持多学科模型集成的流域决策支持系统框架研究. *遥感技术与应用*, 28(3): 511-519)
- Zhan C S, Ning L K, Zou J, Han J. 2018. A review on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations. *Acta Geographica Sinica*, 73(5): 893-905 (占车生, 宁理科, 邹靖, 韩建. 2018. 陆面水文—气候耦合模拟研究进展. *地理学报*, 73(5): 893-905) [DOI: 10.11821/dlxb201805009]
- Zhang B G, Zhu C G and Wang R S. 2005. Improved methods of base state with amendments on spatio-temporal data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 34(3): 252-256 (张保钢, 朱重光, 王润生. 2005. 改进的时空数据基态修正方法. *测绘学报*, 34(3): 252-256) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2005.03.012]
- Zhang K R, Yang S P, He L X and Long Y. 2017. Research on emergency evacuation of passengers with luggage from bus station. *China Safety Science Journal*, 27(1): 30-35 (张开冉, 杨树鹏, 何琳希, 龙琪. 2017. 基于社会力模型的车站负重人群疏散模拟研究. *中国安全科学学报*, 27(1): 30-35) [DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.01.006]
- Zhang L, Parker G, Stark C P, Inoue T, Viparelli E, Fu X and Izumi N. 2015. Macro-roughness model of bedrock-alluvial river morphodynamics. *Earth Surface Dynamics*, 3(1): 113-138 [DOI: 10.5194/esurf-3-113-2015]
- Zhang M D, Yue P and Gao F. 2018. A geographic model integration approach and implementation based on coupling components and services. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(7): 1106-1112 (张明达, 乐鹏, 高凡. 2018. 组件与服务耦合的地理模型集成方法与实现. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(7): 1106-1112) [DOI: 10.13203/j.whugis20160251]
- Zhang P C, Zhang L and Wang J M. 2017. A model for precipitation forecasting of mutiple environmental factors based on deep network. *Computer Applications and Software*, 34(9): 240-245, 261 (张鹏程, 张雷, 王继民. 2017. 一种基于深度网络的多环境因素降水量预报模型. *计算机应用与软件*, 34(9): 240-245, 261) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2017.09.047]
- Zhang X C, Liao X and Ruan Y J. 2023. Discussion on digital twin and metaverse in smart city construction. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (1): 1-7, 13 (张新长, 廖曦, 阮永俭. 2023. 智慧城市建设中的数字孪生与元宇宙探讨. *测绘通报*, (1): 1-7, 13) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2023.0001]
- Zhao R J. 1992. The Xinanjiang model applied in China. *Journal of Hydrology*, 135(1/4): 371-381 [DOI: 10.1016/0022-1694(92)90096-E]
- Zhou C H. 2015. Prospects on pan-spatial information system. *Progress in Geography*, 34(2): 129-131 (周成虎. 2015. 全空间地理信息系统展望. *地理科学进展*, 34(2): 129-131) [DOI: 10.11820/dlkxjz.2015.02.001]
- Zhou T J, Yu Y Q, Yu R C, Liu H L, Li W and Zhang X H. 2004. Coupled climate system model coupler review. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 28(6): 993-1008 (周天军, 俞永强, 宇如聪, 刘海龙, 李薇, 张学洪. 2004. 气候系统模式发展中的耦合器研制问题. *大气科学*, 28(6): 993-1008) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.16]
- Zhu A X, Zhu L J, Shi Y X, Qin C Z and Liu J Z. 2019. Integrated watershed modeling and scenario analysis: a new paradigm for integrated study of physical geography?. *Progress in Geography*, 38(8): 1111-1122 (朱阿兴, 朱良君, 史亚星, 秦承志, 刘军志. 流域系统综合模拟与情景分析——自然地理综合研究的新范式?. *地理科学进展*, 38(8): 1111-1122) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.08.001]
- Zhu J, Fu L, Li W L, Zheng Q H, Hu Y, Guo Y K, Huang P C and Yang L. 2020. Knowledge-guided dynamic representation method of landslide disaster scene. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(8): 1255-1262 (朱军, 付林, 李维炼, 郑全红, 胡亚, 郭煜坤, 黄鹏诚, 杨利. 2020. 知识引导的滑坡灾害场景动态表达方法. *武汉大学学报(信息科学版)*, 45(8): 1255-1262) [DOI: 10.13203/j.whugis20200027]
- Zhu L J, Liu J Z, Qin C Z and Zhu A X. 2019. A modular and parallelized watershed modeling framework. *Environmental Modelling and Software*, 122: 104526 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.104526]
- Zhu Q, Hu M Y and Huang L H. 2009. Dynamic representation of 3D house properties based on hierarchical events. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 34(3): 326-330 (朱庆, 胡明远, 黄丽慧. 2009. 基于多层次事件的三维房产动态表示. *武汉大学学报(信息科学版)*, 34(3): 326-330)
- Zhu S Y, Yang H W, Yin G P, Chen X and Deng R C. 2023. Research on smart water conservancy framework system based on digital twin. *Hydro-Science and Engineering*, (3): 68-74 (朱思宇, 杨红卫, 尹桂平, 陈璇, 邓人超. 2023. 基于数字孪生的智慧水利框架体系研究. *水利水运工程学报*, (3): 68-74) [DOI: 10.12170/20220120001]

Zhu Y L, Feng J, Li Z J, Zhang K, Zuo X and Liu X H. 2022. Building a digital twin Qinhuai River, realizing the “Four Pre” ability of watershed management. *Jiangsu Water Resources*, (S2): 1-4 (朱跃龙, 冯钧, 李致家, 张珂, 左翔, 刘修恒. 2022. 建设数字孪生秦淮河实现流域管理“四预”能力. *江苏水利*, (S2): 1-4) [DOI: 10.16310/j.cnki.jssl.2022.s2.023]

Zhuang J W, Jacob D J, Gaya J F, Yantosca R M, Lundgren E W, Sulprizio M P and Eastham S D. 2019. Enabling immediate access to earth science models through cloud computing: application to the GEOS-Chem model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10): 1943-1960 [DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0243.1]

Progresses in integrated application methods of geographic analysis models for virtual geographic environment construction

YUE Songshan, LYU Guonian, WEN Yongning, CHEN Min

1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China;

3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Geographic analysis models serve as crucial resources for tackling geo-problems, simulating geographic environments, and supporting decision-making analysis. They play a key role in constructing virtual geographic environments (also known as digital twin geographic environments). Integrating geographic analysis models with diverse simulation capabilities from various fields enables a comprehensive representation of real geographical environments. This integration supports the development of visual, usable, analyzable, and interactive virtual geographic environments.

This study systematically examines the current research progress in the integration methods of geographic analysis models. In general, integrating physical and social processes and merging big data with deep learning have gained increased attention in recent years. Compared with using a single model, multimodel integration enhances the understanding of the objective geographical world by integrating multiple elements and processes. Integrating models within a single domain or across domains ultimately involves basic execution links, such as combining, nesting, and connecting multiple models in a specific computing environment. In response to this, customized integration and modular integration are the main approaches to current geographical analysis model integration research. Customized integration offers tailored solutions for specific models considering cognitive and technical characteristics. However, it is heavily influenced by individual model characteristics and may become unsustainable during the integration of numerous models, leading to frequent revision activities. Modular integration relies on standardized components with clear association logic and supports component replacement. However, it faces strong technical dependencies and constraints, such as those that involve programming language, data structure, and operating environment. In practice, current model integration research often varies between customization and modularity, with the former lacking sustainability and the latter being limited by compatibility issues.

In this study, the idea of a “geographic analysis model container” is proposed, and the methods are implemented to address the problems mentioned. With the assistance of the concept of containerization, the data, programs, and computing resources upon which geographical models rely are loaded into a “container.” Then, the model is developed in a customized manner within the container, while the modular model integration work occurs outside the container. Striking a balance between customized and modular approaches is anticipated to enhance the overall effectiveness of geographic modeling and simulation efforts. Conducting a multilevel, multigranularity, and multiscale integration across elements, processes, and functional relationships is necessary for addressing specific geographical problems. The development of “geographic analysis model containers” tailored to express geographical system evolution laws and driving mechanisms has become crucial.

Accumulating and improving model integration capabilities based on containers is expected to establish an effective bridge between model construction, transformation, and integration. This advancement can promote geographical models from experimental tools to essential components of social service infrastructure. Decision-making analysis, solution simulation, and customized planning capabilities can be provided for various digital twin geographical scenarios (such as digital twin cities, digital twin river basins, and digital twin water conservancies) by integrating geographical analysis models. This integration drives advancements in digital twins, metaverses, and digital human technology, spanning visual experiences, operation, and maintenance management. It also incorporates geographical knowledge, enhances interactive functions, and promotes a comprehensive understanding.

Key words: remote sensing, geographical analysis models, virtual geographic environment, digital twin geographic environment, model integration, geographical analysis model container

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41930648, 42171406, 42071363, 42071361)