地理综合研究方法的发展与思考

闫国年^{1,4,5}, 周成虎^{2,4}, 林琿³, 陈旻^{1,4,5*}, 乐松山^{1,4,5}, 温永宁^{1,4,5}

1. 南京师范大学, 虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023;
2. 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;
3. 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022;
4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023;
5. 江苏省地理环境演化模拟国家重点实验室培育建设点, 南京 210023

* 联系人, E-mail: chenmin0902@163.com

2020-06-29 收稿, 2020-09-27 修回, 2020-09-29 接受, 2020-12-30 网络版发表

国家自然科学基金(41930648)和国家自然科学基金-广东大数据中心项目(U1811464)资助

摘要 地理系统是一个复杂巨系统, 地理综合研究是整体性认知与理解地理系统的重要途径. 随着地理学的发展演进, 地理综合成为新时期地理学创新与突破的根本任务; 发展地理综合的理论方法, 成为防止地理学空心化, 建立地理学核心理论的重要途径. 然而, 传统地理综合方法多采用“先分后综”的思路, 导致“易分难综”, 地理综合方法体系亟待进一步探索. 本文总结了现有地理综合相关研究及方法, 分析了阻碍地理综合研究方法发展的根结所在, 提出了发展基于地理模态的地理综合研究方法新构想. 地理模态作为地理系统规律性认知的描述形式与表达机制, 是比地理要素与地理过程更高层次的抽象载体; 以多层次地理模态的有机聚合、有序迭代形成地理系统的整体性、系统性认知, 有望指导后期地理系统的综合研究与模型重构. 基于地理模态的地理综合研究方法将试图打通片段地理认知到综合地理认知的双向通道, 构建地理数据到地理规律再到综合地理认知的模型方法, 推动地理综合研究在理论和方法上的协同演进, 促进地理综合研究的发展.

关键词 地理综合, 地理模态, 地理规律, 地理分析, 地理建模

区域性和综合性是地理学两大重要特征; 地理区域研究与地理综合研究是地理学研究的两个主要方向. 地理区域性研究关注于“定位”, 针对地球表层某个特定区域, 界定研究对象的范围与边界, 观察分析其自然和人文现象, 探索其空间特征及异质性. 地理综合性研究立足于地理系统“共生共长”的本质特征, 将地球表层或特定地理系统作为统一整体, 对其组成要素及其空间结构、演化过程与相互作用机理开展系统性研究. 通常情况下, 区域性研究主要聚焦于某一地理系统空间特征及其内部差异特性的挖掘, 而综合性研究既要兼顾地理系统、子系统内要素之间的生物、物理、化

学作用及机制, 又要挖掘系统、子系统之间的关联与影响, 从而形成具备整体性、全局性的地理认知.

20世纪60年代, 国内外学者普遍开始关注地理学综合性研究, 试图发展从定性到定量集成研究方法; 李春芬^[1]的“地域综合体分析”, 吴传钧^[2]、陆大道^[3]的“人地关系地域系统”, 黄秉维^[4]的“综合与分析方法”, 郑度和傅小锋^[5]的“自然地理综合区划”, 无不体现与渗透了地理综合研究的思想与追求. 然而, 随着地理学各部门研究的纵深发展, 面向特定区域内单要素、单过程、单系统的表达与分析已明显走向成熟, 但由于地理系统及其要素的复杂性、时空过程的交互性、作用边界

引用格式: 闫国年, 周成虎, 林琿, 等. 地理综合研究方法的发展与思考. 科学通报, 2021, 66: 2542–2554

Lü G N, Zhou C H, Lin H, et al. Development overview and some thoughts on geographic synthesis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 2542–2554, doi: [10.1360/TB-2020-0799](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0799)

的模糊性等特性,地理综合研究的发展始终显得“心有余而力不足”。21世纪初,国内诸多地理学家开始重新审视与思考新时代地理学的发展方向^[6-8],普遍认为开展多要素、多过程、多系统的综合性探索理所当然成为地理学尚未完成且亟须突破的根本性任务^[9-12]。

从方法论的角度,地理综合研究方法主要经历了4个发展阶段:(1) 20世纪80年代以前,面向自然环境分界、土地利用分类、农业生产分区等客观需求,地理综合研究主要借助自上而下区划手段,对地理综合体的组成要素与属性进行定性描述;(2) 20世纪80年代之后,随着GIS等空间信息技术的发展,空间叠置分析、要素聚类分析等手段被应用于地理综合,支持对地理综合体组成要素及其数据的定性与定量描述;(3) 2000年以来,当地理学研究不再满足于静态格局描述,而愈加关注于“格局-过程-相互作用”的多层面解释时,基于机理过程的陆表模型得到了快速发展,并被广泛应用于地理综合研究,为地理综合体的数理模型表达提供了途径;(4) 2010年以来,随着大数据时代的来临,地理大数据分析方法逐渐被应用于地理综合体各种要素格局及其内外关系的表达。可以看到,技术进步对地理综合研究方法的发展起到了推动作用,以综合、定量视角对人地系统开展理解的主导性思想逐渐明晰^[13],对地理系统要素、格局、演化过程进行一致性探索的研究范式也浮出水面^[14],但地理综合研究方法的不足依旧明显:无论是“自顶而下”的系统分解,还是“自底而上”的要素综合,都始于个性化研究对地理系统的理解与认知,缺乏共同的认知基础以支持研究结果的统领与进阶综合;此外,研究方法的体系性有待建立、兼容性有待探索、实用性也有待提升^[15,16]。

为了促进地理综合研究的进一步发展,本文总结、归纳了地理综合研究的相关方法,分析了当前地理综合研究方法存在的问题,提出了基于地理模态的地理综合研究新构想,试图推动地理综合研究在理论和方法上的协同演进,提升地理信息科学对地理综合研究的支撑效能。

1 地理综合研究相关方法现状分析

地理系统是地理综合研究的主体,其主要是指在地理学研究视角下,地理环境中各种自然与人文要素共同构成的统一整体。在客观地理规律的制约下,地理系统内的各种要素相互作用,不断进行着物质、能量和信息交换。当下,地理系统已经成为地理学研究的主

体,而系统科学也已经成为地理系统研究的重要范式^[4]。基于系统论、信息论、控制论等现代科学理论,地理系统的特征性认知逐渐形成:一个开放、非平衡的系统,系统内各要素间存在复杂的线性/非线性相互作用^[17,18]。近年来,以地球系统集成框架(EMF)、未来地球(Future Earth)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、联合国可持续发展(SDGs)、地球关键带为代表的集成模拟研究得到快速发展,这既反映了地理系统的综合性和复杂性的本质特征,也体现了地理综合研究的时代性需求。

地理认知是地理综合研究的主要目的,地理分析与地理综合是地理综合研究“指臂相使”的两个重要组成部分^[4],因此本文拟从地理认知方法、地理分析方法及地理综合方法三方面进行阐述:

1.1 地理认知方法

地理认知方法是理解地理系统的基本途径。地理认知涉及人类感知、记忆、推理等众多方面^[19,20]。面向地理系统的认知,不同领域针对其研究对象,形成了不同的认知体系。例如,面向土壤体系的认知,形成了以发生学分类等方法支持的土壤分类认知体系^[21,22],面向水文系统认知,出现了基于河流价值等因素的水文分类认知体系^[23,24],面向固体地球系统认知,出现了以年代地质、岩石地质为因素的分类认知体系^[25]。虽然各领域对地理系统认知体系各不相同,但主要关注于要素类别、空间格局^[26]、演化过程^[27,28]等方面的认知。随着数据采集能力的加强,地理系统认知的研究更加强调从各个层次、各个领域综合理解地理系统及地球表层过程发生的机理;但是由于地理系统的复杂性,国内外学者对地理系统的综合性认知探索还处于起步阶段^[29]。

在众多地理认知方法中,归纳法和演绎法是使用最为广泛的科学研究方法^[30]。从信息科学的角度来看,地理系统认知中的归纳法贯穿了从地理信息获取、抽象、转换到地理系统表达与分析的全过程^[31]。目前,归纳法已经在各部门领域对地理系统的研究中得到广泛应用,涉及气象学、地质学、经济地理、人文地理等各个方向^[32-34]。但是由于缺乏对内在机理与关联的深入挖掘,事实和假设之间往往存在逻辑缺陷,导致归纳不全、归类不清。演绎法的思维过程是由总体到局部、由概念到事实、由总括到观察,从而开展必然性推理。气候学在理论和方法上一直沿着演绎的方向发展,地貌学和地质学则在沿着归纳方向发展的基础上,

逐步以演绎法作为系统方法的重要补充^[35]。在实际应用中,归纳和演绎在地理系统认知中都起着重要的作用,相互依赖、相互渗透,并在一定条件下可以相互转换。

地理抽象是地理认知的基础环节^[36]。地理系统认知的信息化辅助手段经历了从传统地图、计算机辅助图形图像、GIS,到现在的虚拟环境系统的变化,其背后实质体现了地理系统抽象与组织方法的发展^[37]。可以认为,地理系统抽象与组织方法经历了地图数据模型、空间数据模型、时空数据模型以及地理场景模型的发展^[38]。由于地图是地理系统认知结果的最直观抽象表达形式和载体,所以传统地理系统与抽象表达往往从地图制图的视角出发,将地理系统抽象为连续的“场”、离散的“对象”或“场”与“对象”统一描述的“对象场”^[39]、“地理原子”^[40]或“通用场”^[41],试图描述地理现象个体在位置、几何、专题属性等方面的特性以及它们之间的空间关系^[42]。为了描述地理系统的动态变化特性,在场模型和对象模型的基础上增加时间特性描述,以表达地理特征在位置、几何和属性上的变化轨迹,出现了一系列时空数据模型^[43-45]。然而地理系统抽象方式基本都是针对单一类型地理要素的时空过程,尚难以刻画地理系统中多要素、多过程复杂作用所表现的地理系统演变规律。况且,不同类型的抽象方式往往侧重地理要素的时空变化,存在着描述以及表达方法上的差异,难以在一个整体框架下,对地理格局、演化过程以及相互作用机理进行一致性描述。

面向地理系统的认知,其内容与方法都相对明晰,要充分借助归纳法“自下而上”与演绎法“自上而下”的深度融合,兼顾“局部”与“整体”特征对地理系统进行探索与研究,不仅要能感知其现象,而且要能明晰其机理。然而,现有的地理系统认知手段还有待改进。现有的地理系统认知研究,多关注于对地理系统结构内某些节点上要素与过程的理解,缺乏对地理系统框架性结构及统筹性规律的挖掘,导致对地理系统的整体性认知缺失,特别是借助现有地理信息技术开展地理系统认知时,在抽象时往往“重个体、轻全局”、“重空间信息获取、轻地理规律发现”,从而阻碍了对地理系统全面、整体的认知。

1.2 地理分析方法

为了对地理系统开展深入了解,揭示数据以外的隐含信息,面向不同部门领域,出现了多样的地理系统

分析方法^[46]。(1)面向水文系统分析,基于代数学方法,研究关注于描述水文过程机理的模型开发^[47,48],数值分析方法成为水文过程模拟和分析的主要手段^[49-52]。(2)面向土壤系统分析,为了充分认识土壤的形成、演变和发展过程,需要对土壤进行定量化描述^[53]。因此,土壤学家使用时间序列方法和模式定量分析方法,研究土壤发生和演变;基于地统计学、模糊数学和机器学习的土壤分析方法,对土壤信息进行分析^[53-60]。(3)面向大气系统分析,为了进行气候变化的模拟与预测,相关学者基于能量守恒、动量守恒等基本物理学方程,建立了气候系统模式^[61-65]。此外,为了分析空气质量和气象状况,基于代数方法模拟了空气污染物扩散过程,利用人工智能方法实现对空气质量和气象的预测^[66-69]。(4)面向生态系统分析,空间统计方法被看成是生态领域重要的分析方法^[70-72]。例如,为了分析物种分布、生物多样性、种群或群落之间的相互作用关系,许多概率模型被引入到生态研究之中,如贝叶斯网络、泊松回归模型、马尔科夫链等^[71,73]。此外,还可以将空间关联分析方法、空间插值方法、空间聚类分析方法和地图代数等方法,应用于生态分析、野生动物保护、生态恢复等方面^[74-77]。(5)面向人类活动及其系统分析,空间点模式方法、时空可视化方法、元胞自动机等方法被设计出来^[78-80],对手机用户行为、城市道路状况、疾病分布、犯罪分布、社会经济变化等现象进行分析^[81-87]。

此外,地理数据获取技术的飞速发展,为地理系统认知和探索提供了海量地理数据,推动了地理大数据研究范式的兴起^[88-90]。但是,由于这些数据具有体量大、多源、异构、多维、动态等复杂特征,传统地理系统分析方法难以用于地理大数据分析之中^[91-93]。因此,为了分析挖掘海量地理数据背后有价值的信息,诞生了地理大数据分析方法^[94-96]。该类方法多基于规则归纳、语义提取、空间关联等手段,对研究对象进行分类、提取和融合,再基于空间统计学、深度学习、模糊集、粗糙集等理论,探索地理系统数据间的相互关系^[95,97,98]。

可以看到,现有的地理系统分析方法在各个领域都有所建树。但是,由于研究领域之间的理论不同,以及研究对象的差异,不同领域的地理系统分析方法不尽相同,有的在原理上还差异甚大,“由表及里”的数据统计分析和“由里及表”的机理建模分析之间存在明显的隔阂,这些都导致了已有的很多方法难以直接集成

应用于综合地理系统研究。借助地理大数据分析方法开展地理系统分析成为近来的趋势,但是数据的纷杂性、多样性导致难以在统一可操作框架下对地理系统的众多信息进行聚合,且相关分析方法多集中于对人类社会活动现象及问题等短时间过程现象的研究,缺乏对各种地理现象背后作用过程及机制的分析,因此大数据分析仍无法直接应用于地理系统形成及演化因果关系的解释。

1.3 地理综合方法

地理系统综合研究是对陆地表层地理现象与地理过程中各要素相互作用及人地关系的研究,可以帮助对地球过去、现在和未来有更进一步认知^[99]。20世纪60年代,黄秉维^[100]就提出综合是地理学生存之本,综合性是地理学最高层次的科学难点问题,而自然要素(包括水资源、矿产资源、生态环境等)和人文要素(包括信息、科技、体制创新等)都是地理学综合的要素^[9,101]。陆地表层的地理现象与地理过程均是多个地理要素共同作用的结果,所以地理学综合性研究核心任务之一是理解不同尺度之间地理要素的相互作用及在空间上表现出来的整体特征^[14]。地理学的综合研究可以分为4个研究阶段^[15],分别为:(1)对自然和人文要素进行区域内罗列;(2)基于GIS将特定区域内环境要素进行空间叠加,表达空间上多要素之间的叠加关系和综合特征;(3)考虑特定区域多个核心要素的相互作用;(4)基于复杂性的区域系统综合研究。

在传统地理系统综合研究中,自然地理和人文地理的研究方法都自成体系。在自然地理系统研究过程中,主要关注于对自然地理过程综合和陆地表层系统集成,相关研究也在从自然-自然向自然-人文方向,及从单要素、单过程向多要素、多过程耦合方向发展^[102,103]。目前,自然地理系统综合分析方法被诸多领域所重视,主要应用于自然区划^[104,105]、区域自然地理^[106]和土地系统^[107]等方面。由于人文要素的复杂性、边界模糊性及地球表层人居环境急剧变化等因素,人文地理系统综合性研究也日益凸显^[108]。尤其是综合区划研究,需要充分考虑人文要素的地域分异性和相似性^[109]。而寻求人地系统综合分析方法,则更是地理学持续发展的动力所在^[110,111]。

当下,地理信息科学的发展,为地理综合研究提供了现代化分析工具。在地理综合研究中,地理信息科学已经贯穿各个环节^[14]。一方面,相关的数据分析方法,

例如空间聚类、神经网络、随机森林等算法为特定主题的地理综合研究提供了支撑^[112~115];另一方面,支撑特定地理系统过程模拟的集成建模与模拟方法也逐渐成为地理综合的一种途径^[116~120],出现了一些综合人文过程和自然过程的集成模型^[121,122]。

地理综合的总体变化特征是从“多元”走向“系统”,但随着地理综合的要素、过程越来越多,问题也越来越复杂。目前,针对单要素、单过程变化趋势的研究较为成熟,面向简单系统综合也有较多成果;但涉及多过程、多系统的地理综合,其综合能力尚有所欠缺。现有的地理综合方法,缺乏统一的理论框架与计算载体,导致不同的地理综合研究及成果呈现“围墙式”发展,各种综合标准难以互相兼容,不同综合方法难以耦合,更难以支撑地理综合推理计算,导致当下地理系统综合仍难以有新突破。

2 地理综合研究方法的思考——基于地理模式的构思

可以看到,当前地理综合研究基本遵循“先分后综”的模式,即按照不同的研究领域、时空尺度、关注问题等,将地理系统分解为不同的系统、要素等对象,将系统的演化则归类为不同的过程,分别开展纵深分析与研究;当需要进行综合研究的时候,将各种系统(子系统)、要素(子要素)、过程(子过程)进行叠合,以期得出综合性论断。该模式已经被运用于多种专题类型的综合研究,如自然区划、区域自然地理和土地系统等^[123]。然而,由于地理系统的复杂性,面向更高层级的地理综合认知,“先分后综”的研究模式还存在较大问题和诸多挑战:(1)由于认知的局限性和领域的专业性,通常在“分”的时候就已经忽略了较多领域研究者自以为不相关、不重要的要素及过程,在综合时的东完西缺经常导致“综而不全”;(2)按学科、领域经验进行的分类、分区、分块,不可避免割裂了地理系统及其内在要素的联系与相互作用,在综合时各种要素的罗列容易导致“综而不合”;(3)由于认知及领域的差异性,各种划分方法缺乏统一的依据与标准,而综合方法又缺乏系统观指导下的统一理论框架,导致多种类别综合方法得出的结果难以匹配,更难以直接应用于面向地理系统的整体性综合认知,常常造成“综而不谐”。

理论上,无论研究者如何分类,地理系统始终存在,各种要素与过程相互依存。为了开展地理系统深入研究,将地理系统按照相似性、差异性进行“切割”本无

可厚非;但通常情况下,传统的分类多直接面向地理要素和过程,由于粒度太细、较专,缺乏对相互联系、相互作用的考虑,导致“组装时”整体观缺失,难以支撑有效的地理综合。依据辩证思维,整体不等于部分之和,但可以认为是部分及其相互关联、相互作用之和^[124]。如果能找到比要素与过程更高层次的抽象载体,除了能够表达空间结构、演化过程、相互作用等地理系统本征外,向下能够支撑地理机理的引导挖掘,向上能够刻画地理系统内外部各种关系,则有可能支撑“脉络清”而“机理明”的地理系统整体而全面认知。

对此,我们开始尝试基于地理模态的地理综合方法论思考。事实上,溯源地理研究的本质,不管依据哪种研究范式,都是对地理系统固有规律的探索过程^[125]。尽管不同学科研究者对地理系统开展了纷繁多样的研究工作,但其本质性指导都是建立在物质守恒、能量守恒、质量守恒等基础物理规律之上的。地表空间的水热条件和固体地球的运动特征在整体上主导了地理系统的时空格局,自然地理学中经典的“地域分异-区域等级-地段类型”研究体系事实上也是将地理系统作为结构系统看待。因此,在不考虑人类活动对地理环境影响的前提假设下,整个地理系统与一般结构化的物理系统相当。然而,对一个结构系统而言,模态分析是获取整体特征和开展综合研究的常用手段;通过类比与对比,以下展开对地理模态研究的构思。

(1) 模态分析主要是计算结构系统的振型、固有频率和阻尼比参数,围绕结构系统的运动规律开展探索。与之类似,地理学研究者可以以地理规律的探索为驱动,寻求地理系统各种现象和过程的主导因子,从而指导社会实践。

(2) 结构系统的模态与其自由度紧密相关,单自由度对应一阶模态,多自由度对应多阶模态。与之类似,地理系统在“水土气生”各种要素的相互作用下,包含有复杂多样的地理规律,即呈现出“多自由度”的状态(对地球系统这个复杂巨系统而言,甚至很难确定其具体有多少自由度)。

(3) 每一阶的模态都有其对应的固有频率,且固有频率与振型之间一一对应。第一阶模态所对应的振型,也称为第一振型,并由此类推第二振型、第三振型等。对应到全球尺度的地理系统中,水热分布可以认为是第一地理模态,其主导的地带性分异结构可以认为是第一振型。

(4) 对于一个模态而言,其内部包含了振型、固有

频率和阻尼比信息,而在外部往往通过初始相位、振幅和周期来刻画。对应到地理系统中,初始相位可以认为是一个地理规律起作用的初始条件,振幅可以认为是一个地理规律涉及的时空和属性范围,周期可以认为是一个地理规律对应的演化周期。如图1所示。

基于以上四点思考,模态分析思路应该适用于自然状态下的地理系统。进一步地,对地理系统中的人类活动而言,一方面不能脱离自然环境独立存在;另一方面群体活动也具有相应的规律特征(如经济驱动、社会驱动等)。利用模态分析的手段,可以综合考虑自然和人文要素的影响,获取不同阶的地理模态。基于地理模态来开展地理综合研究,区别于传统先分指标因子、再综合的研究思路,而是将地理系统视作由不同主导因子共同作用的结构系统:一个地理模态对应形成地理环境特征的一个主导因子,且内含了该主导因子所涉及的地理要素和要素之间的作用关系。以地理模态为媒介,通过统计分析建模和机理过程模拟的方法,向内可以探索形成该模态的地理规律数理理解(因果分析),向外可以对多个地理模态之间的相互关系进行整体分析(关联分析)。由此,本文试图通过对地理模态的思考,为地理综合研究提供一个新的思维起点和工作途径。

就地理模态方法的可行性而言,现有大气、海洋、地貌等领域的研究提供了相关的支撑和佐证^[126-131]。典型的如利用经验正交分解(empirical orthogonal function, EOF)方法,对时序的气象变量进行诊断分析,分解并获取不同数量的模态。在此基础上,研究者往往结合经验性的地理认知和实际地理事件,对EOF的主要模态进行动力机制分析。近年来,利用地球系统模式来解读EOF模态的方式也逐渐受到重视。此

图1 地理模态的构成
Figure 1 Composition of the geographic modal

外,经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)及其改进方法也常用于地理环境的分析研究中。基于EMD模态分解方法,可以获取不同的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)和一个余量函数。研究者一方面对IMF和余量函数的尺度信息和局部特征进行深入分析,另一方面根据已有的地理知识对模态分解结果进行归因解读。可以看到,对客观地理世界的观测数据进行模态分解、再对模态的结构和内容特征进行分析、进而对模态的成因进行机制建模,这一套研究思路是可行的。但是,现有模态分解研究对观测数据的依赖性极强,且用于模态分解的环境变量与已知的地理规律之间仍然存在相互割裂的情况。如何发展一套能够处理高维数据、适应于地理综合研究的模态分解方法,如何将已有地理认知和表达成因机制的数学模型映射到地理模态中,都需要进一步深入研究。

就地理模态方法对地理综合的支撑途径而言,一方面需要研究从地理系统中获取不同地理模态的方法,另一方面也需要研究如何对地理模态进行一致性表达,从而使得不同模态之间的综合成为可能。前者可以从现有模态分解方法进行延伸和发展,后者可以类比于结构系统中模态分析的表达方式(初始相位、振幅、周期),构建适合于地理模态表达的结构框架。该结构框架不仅需要将一个地理模态所关联的要素和作用关系

表达出来,还需要将其内蕴的地理规律按照统一的方式进行表达。换言之,在地理模态内部,可以认为是一个数学计算模型(可能由多个子模块组合而成),该数学计算模型解释了地理模态的成因机制;在地理模态外部,可以认为是其所关联数学计算模型的初始相位(如初始条件、起始时间等)、振幅(如控制参数、边界条件等)、周期(如时间跨度、空间尺度等)。由此,在统一的结构框架下,不同的地理模态仍然可以“分”开研究,但研究的结果是可积累的,能够在确定的坐标系下进行“综合”。地理模态的研究并不排斥现有的各种数据分析方法和建模模拟方法,更加强调通过物理、化学、生物、人文、社会、经济等模型来寻求地理规律在统一结构框架中的融合。地理模态的研究思路与地球系统模式、陆面过程模式、大气/海洋模式等研究并行不悖,地理建模领域的发展可以为地理模态和地理综合研究提供强有力的支撑。

围绕“如何利用地理模态的整体性特征,构建地理综合体的认知模型与表征方法”、“如何基于地理模态的结构特征,构建面向地理综合的地理模态探测、分析与聚合方法”两大科学问题,笔者面向实现难点问题,尝试梳理出一套完整的实施思路,以充实该构想(图2)。

(1) 如何开展地理模态的认知抽象与结构表达研

图 2 基于地理模态的地理综合研究思路

Figure 2 The pathway of geographical synthesis research based on geographic modal

究,构建地理模态的理论框架,解决地理模态具象化认知问题?需要从地理系统的特征分析入手,结合现有关于地理模态研究的内涵分析,通过系统思维指导下的归纳与演绎,对地理模态所表达的空间格局、演化过程和作用机制进行层次解构和粒度分解,设计并构建地理模态的分类体系和表达体系,并由此实现基于模态的地理系统描述框架。

(2) 如何实现地理模态的探测方法,探测地理综合体中的不同模态,解决地理模态的发现?需要梳理从客观地理系统中探测多层次地理模态的方法;通过模态资源库和匹配方法库的构建,形成已知模态的匹配甄别方法体系;融合时空数据统计分析和机理过程模型模拟方法,发展兼顾两种方法的模态辨识提取方法,构建未知模态的辨识提取方法体系;从而形成高效、可复用的地理模态探测方法体系。

(3) 如何设计地理模态的分析方法,挖掘地理规律与地理模态之间的关系,实现地理模态对地理规律的表达?需要围绕地理模态在地理综合研究中的串联和媒介作用,以因果关系和关联关系作为地理分析与综合的骨骼脉络,探索基于诸如多维关联图Graph结构的地理模态内部成因分析;以关联度指标为内核,构建支撑计算地理模态与外部地理系统之间关联关系的规范化算子,通过规范化算子的组合、嵌套与连接,实现地理模态的外部关联分析。

(4) 如何发展地理模态的聚合方法,探索地理模态对求解地理综合体问题的途径,实现基于地理模态聚合的地理综合方法,形成更高层次的地理系统规律性认知?通过多层次地理模态的聚合和模态关联网络的构建,形成面向区域地理系统的地理模态体系(即通过模态探测获取到的不同地理模态),从支撑认知理解和

计算求解的角度构建基于模态的地理综合与分析框架;基于此框架实现融合底层(模态内部的机理)、中层(模态之间的关联)、上层(多模态形成的关联网络)的地理系统认知、综合与分析方法,支撑地理系统综合性规律认知的形成。

3 结论

地理综合是地理学最基本的逻辑思维方法,地理综合研究方法是地理系统及地理综合体研究的核心方法。传统地理学基于“还原论”的思维方式,对地表环境要素进行分解式研究,割裂了地理要素的内在联系,忽视了地理作为有机系统的本源特征,从而难以支撑整体论思维逻辑的构建^[19]。现有的地理综合方法基本遵循“先分后综”的模式,由于在“分”时缺少地理系统整体性认知的指导,在“综”时缺乏全局性理论框架的支撑,从而造成了地理综合之路障碍重重。如何面向地理系统的整体性、复杂性与联系性,兼顾“还原论”与“整体论”方法体系的融合,构建符合地理系统“自顶而下”分析与“自底而上”综合的无障碍通道,是目前地理综合研究的难点,更是现代地理学发展的突破口。

本文分析了地理综合研究方法的发展现状,总结归纳问题所在,尝试提出基于地理模态的地理综合研究方法构想,旨在以内涵空间格局、演化过程、相互作用机理的地理规律性认知为指导,以地理模态作为规律性认知表达及计算的载体,发展兼备统一理论基础与操作方法的地理模态综合与分析框架,形成格局、过程、机理兼顾的地理综合模态方法体系,打通片段地理认知到综合地理认知的双向通道,形成地理数据到地理规律再到综合地理认知的模型方法,促进地理学综合研究的发展。

参考文献

- Li C F. Recent developments of geography as against its traditions (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1982, 37: 1–7 [李春芬. 地理学的传统与近今发展. *地理学报*, 1982, 37: 1–7]
- Wu C J. The core of geographical study: Man-earth areal system (in Chinese). *Econ Geogr*, 1991, 11: 1–6 [吴传钧. 论地理学的研究核心: 人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11: 1–6]
- Lu D D. Theoretical studies of man-land system as the core of geographical science (in Chinese). *Geogr Res*, 2002, (2): 135–145 [陆大道. 关于地理学的“人-地系统”理论研究. *地理研究*, 2002, (2): 135–145]
- Huang B W. On earth system science and sustainable development strategy (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1996, 54: 350–354 [黄秉维. 论地球系统科学与可持续发展战略科学基础. *地理学报*, 1996, 54: 350–354]
- Zheng D, Fu X F. A preliminary study on issues of integrated geographical regionalization (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 1999, 19: 193–197 [郑度, 傅小锋. 关于综合地理区划若干问题的探讨. *地理科学*, 1999, 19: 193–197]
- Zheng D, Chen S P. Progress and disciplinary frontiers of geographical research (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2001, 16: 599–606 [郑度, 陈述彭.

- 地理学研究进展与前沿领域. 地球科学进展, 2001, 16: 599–606]
- 7 Lu D D. Some key issues concerning development of geographical science in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2003, 58: 3–8 [陆大道. 中国地理学发展若干值得思考的问题. 地理学报, 2003, 58: 3–8]
 - 8 Liu C M, Zheng D, Lu D D, et al. Development orientation for geographical sciences: Written speeches by editors in chief from geographical journals (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2005, 60: 531–545 [刘昌明, 郑度, 陆大道, 等. 地理学研究的发展方向——地理学期刊主编笔谈. 地理学报, 2005, 60: 531–545]
 - 9 Fan J. Comprehensiveness of geography and integrated research on regional development (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2004, 59(Suppl): 33–40 [樊杰. 地理学的综合性与区域发展的集成研究. 地理学报, 2004, 59(增刊): 33–40]
 - 10 Cai Y L, Lu D D, Zhou Y X, et al. National demands for and development strategies of Chinese geography (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2004, 59: 811–819 [蔡运龙, 陆大道, 周一星, 等. 中国地理科学的国家需求与发展战略. 地理学报, 2004, 59: 811–819]
 - 11 Sun J, Pan Y J, Tang M L, et al. The strategic directions for geography (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2013, 68: 268–283 [孙俊, 潘玉君, 汤茂林, 等. 地理学发展的战略方向探讨. 地理学报, 2013, 68: 268–283]
 - 12 Song C Q, Zhang G Y, Cheng C X, et al. Nature and basic issues of geography (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2020, 40: 6–11 [宋长青, 张国友, 程昌秀, 等. 论地理学的特性与基本问题. 地理科学, 2020, 40: 6–11]
 - 13 Fu B J. Geography: From knowledge, science to decision making support (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 1923–1932 [傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. 地理学报, 2017, 72: 1923–1932]
 - 14 Fu B J, Leng S Y, Song C Q. The characteristics and tasks of geography in the new era (in Chinese). *Sci Geogr Sin*, 2015, 35: 939–945 [傅伯杰, 冷疏影, 宋长青. 新时期地理学的特征与任务. 地理科学, 2015, 35: 939–945]
 - 15 Song C Q, Cheng C X, Shi P J. Geography complexity: New connotations of geography in the new era (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 1204–1213 [宋长青, 程昌秀, 史培军. 新时代地理复杂性的内涵. 地理学报, 2018, 73: 1204–1213]
 - 16 Liu Y G, Lu D D, Bao J G, et al. How to revive geography: Our reflection and practice (in Chinese). *Geogr Res*, 2018, 37: 1049–1069 [刘云刚, 陆大道, 保继刚, 等. 如何回归地理学: 我的思考与实践. 地理研究, 2018, 37: 1049–1069]
 - 17 Fang C L. Dissipative structure theory and geogaphy system (in Chinese). *Arid Land Geogr* 1989, (3): 53–58 [方创琳. 耗散结构理论与地理系统论. 干旱区地理, 1989, (3): 53–58]
 - 18 Chen S P. Geo-system and geo-information system (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1991, (1): 1–7 [陈述彭. 地理系统与地理信息系统. 地理学报, 1991, (1): 1–7]
 - 19 Liu M L, Yang B, Huang P P. Geographic research in the information era (in Chinese). *Hum Geogr*, 2002, 17: 13–18 [刘妙龙, 杨冰, 黄佩蓓. 信息时代的地理学研究——NCGIA对若干理论问题的探索. 人文地理, 2002, 17: 13–18]
 - 20 McMaster R B, Uesery E L. A Research Agenda for Geographic Information Science. Boca Raton: CRC Press, 2005. 61–91
 - 21 Li L P, Zhu Y L, Wang X H, et al. Development of soil classification system in China (in Chinese). *J Tarim Univ*, 2001, 13: 32–35 [李立平, 朱咏莉, 王夏晖, 等. 中国土壤分类体系的发展. 塔里木农垦大学学报, 2001, 13: 32–35]
 - 22 Gong Z T, Huang R J, Zhang G L. Introduction to Chinese Soil Geography (in Chinese). Beijing: Science Press, 2014 [龚子同, 黄荣金, 张甘霖. 中国土壤地理. 北京: 科学出版社, 2014]
 - 23 Gurnell A M, Angold P, Gregory K J. Classification of river corridors: Issues to be addressed in developing an operational methodology. *Aquat Conserv-Mar Freshw Ecosyst*, 1994, 4: 219–231
 - 24 He P, Shi P J, Liu S K, et al. Classification of rivers systems (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2008, 19: 434–442 [何萍, 史培军, 刘树坤, 等. 河流分类体系研究综述. 水科学进展, 2008, 19: 434–442]
 - 25 Wang H Z. Some fundamental problems of stratigraphy and the possible tendency of development of stratigraphy in China (in Chinese). *J Stratigr*, 2006, 30: 97–102 [王鸿祯. 地层学的几个基本问题及中国地层学可能的发展趋势. 地层学杂志, 2006, 30: 97–102]
 - 26 Shen S J, Sun Y Z, Zhao X Q. The research and expression of the elements formed urban spatial pattern based-on GIS (in Chinese). *Geomat World*, 2011, 9: 82–87 [申淑娟, 孙毅中, 赵晓琴. 基于GIS的城市空间格局要素研究与表达. 地理信息世界, 2011, 9: 82–87]
 - 27 Dai B, Jin G, Han M F. Analysis on temporal and spatial evolution of marine science and technology total factor productivity and its influencing factors in Chinese coastal areas (in Chinese). *Geogr Res*, 2015, 34: 328–340 [戴彬, 金刚, 韩明芳. 中国沿海地区海洋科技全要素生产率时空格局演变及影响因素. 地理研究, 2015, 34: 328–340]
 - 28 Qiu L X, Xu H T. Analysis of spatial-temporal evolution and impact factors of urban agglomerations carbon emissions in China (in Chinese). *Soft Sci*, 2018, 32: 109–113 [邱立新, 徐海涛. 中国城市群碳排放时空演变及影响因素分析. 软科学, 2018, 32: 109–113]
 - 29 Song C Q, Cheng C X, Yang X F, et al. Understanding geographic coupling and achieving geographic integration (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 3–13 [宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 等. 理解地理“耦合”实现地理“集成”. 地理学报, 2020, 75: 3–13]
 - 30 Lou Y Q. On the method of thinking in the scientific and geographic research and innovation (in Chinese). *J Dalian Educ Univ*, 2000, 16: 72–76 [娄玉芹. 论地理学科学研究与创新的思维方法. 大连教育学院学报, 2000, 16: 72–76]
 - 31 Du Q Y. Theory and methodology is critical for GIS sustainable development (in Chinese). *Geomat World*, 2004, 2: 4 [杜清运. 理论与方法是GIS

- 可持续发展的核心问题. 地理信息世界, 2004, 2: 4]
- 32 Wang R H. Geographical information system (GIS) and geographical analysis (in Chinese). *Prog Geogr*, 2000, 19: 104–109 [王让会. GIS与地理分析. 地理科学进展, 2000, 19: 104–109]
 - 33 Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2012, 67: 3–12 [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67: 3–12]
 - 34 Fan J, Wang C S, Tang Q, et al. Comprehensive geographic analysis and discussion on strategies for post-earthquake recovery and reconstruction in Ludian, Yunnan Province (in Chinese). *Prog Geogr*, 2014, 33: 1011–1018 [樊杰, 王传胜, 汤青, 等. 鲁甸地震灾后重建的综合地理分析与对策研讨. 地理科学进展, 2014, 33: 1011–1018]
 - 35 Zhang J C. Theoretical studies during the modernization of Chinese geography (in Chinese). *Hist Stud Nat Sci*, 2001, 20: 215–224 [张九辰. 中国地理学近代化过程中的理论研究. 自然科学史研究, 2001, 20: 215–224]
 - 36 Gong J H, Li Y B, Wang D J, et al. Characteristics and applications of knowledge maps in geographic knowledge visualization: A case study of spatial planning of dam systems in watersheds (in Chinese). *J Remote Sens*, 2008, 12: 355–361 [龚建华, 李亚斌, 王道军, 等. 地理知识可视化中知识图特征与应用——以小流域淤地坝系规划为例. 遥感学报, 2008, 12: 355–361]
 - 37 Lin H, Chen M, Lu G, et al. Virtual geographic environments (VGEs): A new generation of geographic analysis tool. *Earth-Sci Rev*, 2013, 126: 74–84
 - 38 Lü G N, Chen M, Yuan L W, et al. Geographic scenario: A possible foundation for further development of virtual geographic environments (VGEs). *Int J Digit Earth*, 2018, 11: 356–368
 - 39 Cova T J, Goodchild M F. Extending geographical representation to include fields of spatial objects. *Int J Geogr Inf Sci*, 2002, 16: 509–532
 - 40 Goodchild M F, Yuan M, Cova T J. Towards a general theory of geographic representation in GIS. *Int J Geogr Inf Sci*, 2007, 21: 239–260
 - 41 Liu Y, Goodchild M F, Guo Q, et al. Towards a general field model and its order in GIS. *Int J Geogr Inf Sci*, 2008, 22: 623–643
 - 42 Usery E L. A feature-based geographic information system model. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1996, 62: 833–838
 - 43 Zhu Q, Hu M Y, Huang L H. Dynamic representation of 3D house properties based on hierarchical events (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2009, 34: 326–330 [朱庆, 胡明远, 黄丽慧. 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), 2009, 34: 326–330]
 - 44 Yi J, Du Y, Liang F, et al. A representation framework for studying spatiotemporal changes and interactions of dynamic geographic phenomena. *Int J Geogr Inf Sci*, 2014, 28: 1010–1027
 - 45 Gong J Y, Li X L, Wu H Y. Spatiotemporal data model for real-time GIS (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2014, 43: 226–232 [龚健雅, 李小龙, 吴华意. 实时GIS时空数据模型. 测绘学报, 2014, 43: 226–232]
 - 46 Mennis J, Guo D. Spatial data mining and geographic knowledge discovery—An introduction. *Comput Environ Urban Syst*, 2009, 33: 403–408
 - 47 Chen C, Liu H, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *J Atmos Ocean Technol*, 2003, 20: 159–186
 - 48 Xu Z X. Hydrological models: Past, present and future (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2010, 46: 278–289 [徐宗学. 水文模型: 回顾与展望. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46: 278–289]
 - 49 Douglas-Mankin K R, Srinivasan R, Arnold J G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Trans ASABE*, 2010, 53: 1423–1431
 - 50 Chen C, Limeburner R, Gao G, et al. FVCOM model estimate of the location of Air France 447. *Ocean Dyn*, 2012, 62: 943–952
 - 51 Chu Q Q, Yu H M, Bao X W. The tsunami propagation numerical modeling based on global ocean model GOCTM: Indonesia tsunami on 26 December, 2004 (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2013, 35: 36–46 [褚芹芹, 于华明, 鲍献文. 基于全球海洋模型GOCTM的海啸传播过程数值模拟——以2004印尼大海啸为例. 海洋学报, 2013, 35: 36–46]
 - 52 Sun X, Bernard-Jannin L, Garneau C, et al. Improved simulation of river water and groundwater exchange in an alluvial plain using the SWAT model. *Hydrol Process*, 2016, 30: 187–202
 - 53 Zhang G L, Zhu A X, Shi Z, et al. Progress and future prospect of soil geography (in Chinese). *Prog Geogr*, 2018, 37: 57–65 [张甘霖, 朱阿兴, 史舟, 等. 土壤地理学的进展与展望. 地理科学进展, 2018, 37: 57–65]
 - 54 Zhu A X, Li B L, Yang L, et al. Predictive soil mapping based on a GIS, expert knowledge, and fuzzy logic framework and its application prospects in China (in Chinese). *Acta Pedol Sin*, 2005, 42: 844–851 [朱阿兴, 李宝林, 杨琳, 等. 基于GIS、模糊逻辑和专家知识的土壤制图及其在中国应用前景. 土壤学报, 2005, 42: 844–851]
 - 55 Zhu A X, Yang L, Li B, et al. Construction of membership functions for predictive soil mapping under fuzzy logic. *Geoderma*, 2010, 155: 164–174
 - 56 Li B J, Yu F Z, Ji Y Z. Soil heavy metal spatial interpolation and pollution assessment of Xuzhou Jiuli mine area (in Chinese). *Sci Surv Mapp*, 2010, 35: 166–169 [李保杰, 于法展, 纪亚洲. 徐州市九里矿区土壤重金属插值分析及污染评价. 测绘科学, 2010, 35: 166–169]
 - 57 Dai F, Zhou Q, Lv Z, et al. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau. *Ecol Indic*, 2014, 45: 184–194

- 58 Heung B, Ho H C, Zhang J, et al. An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping. *Geoderma*, 2016, 265: 62–77
- 59 Jiang Z L, Yang Y S, Sha J M. Application of GWR model in hyperspectral prediction of soil heavy metals (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 533–544 [江振蓝, 杨玉盛, 沙晋明. GWR模型在土壤重金属高光谱预测中的应用. *地理学报*, 2017, 72: 533–544]
- 60 Zhu A X, Yang L, Fan N Q, et al. The review and outlook of digital soil mapping (in Chinese). *Prog Geogr*, 2018, 37: 66–78 [朱阿兴, 杨琳, 樊乃卿, 等. 数字土壤制图研究综述与展望. *地理科学进展*, 2018, 37: 66–78]
- 61 Zhou T J, Wang Z Z, Yu R C, et al. The climate system model FGOALS.s using LASP/IAP spectral AGCM SAMIL as its atmospheric component (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2005, 63: 702–715 [周天军, 王在志, 宇如聪, 等. 基于LASG/IAP大气环流谱模式的气候系统模式. *气象学报*, 2005, 63: 702–715]
- 62 Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. The community climate system model version 4. *J Clim*, 2011, 24: 4973–4991
- 63 Wang H. Dynamical analysis of a low-order atmospheric circulation model (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012 [王虎. 低阶大气环流模型的动力学行为研究. 硕士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2012]
- 64 Dufresne J L, Foujols M A, Denvil S, et al. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Clim Dyn*, 2013, 40: 2123–2165
- 65 Luan Y H, Yu Y Q, Zheng W P. Review of development and application of high resolution global climate system model (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2016, 31: 258–268 [栾贻花, 俞永强, 郑伟鹏. 全球高分辨率气候系统模式研究进展. *地球科学进展*, 2016, 31: 258–268]
- 66 Luo Z J, Song L H, Xue Y F, et al. One kind of weather model forecast system based on SVM/RBF (in Chinese). *Comput Eng*, 2006, 32: 31–32 [罗泽举, 宋丽红, 薛宇峰, 等. 一类基于SVM/RBF的气象模型预测系统. *计算机工程*, 2006, 32: 31–32]
- 67 Chi Y Y, Zhang H Y. A review of the development and application of air pollutant dispersion models (in Chinese). *Environ Pollut Control*, 2007, 29: 376–381 [迟妍妍, 张惠远. 大气污染物扩散模式的应用研究综述. *环境污染与防治*, 2007, 29: 376–381]
- 68 Sampson P D, Szpiro A A, Sheppard L, et al. Pragmatic estimation of a spatio-temporal air quality model with irregular monitoring data. *Atmos Environ*, 2011, 45: 6593–6606
- 69 Feng X, Li Q, Zhu Y, et al. Artificial neural networks forecasting of PM_{2.5} pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation. *Atmos Environ*, 2015, 107: 118–128
- 70 Li Y Y. The multivariate analysis methods applying in the domain of ecology (in Chinese). *J Mt Agric Biol*, 2002, 21: 215–218 [李援越. 多元分析法在生态学研究中的应用. *山地农业生物学报*, 2002, 21: 215–218]
- 71 Griffith D A, Peres-Neto P R. Spatial modeling in ecology: The flexibility of eigenfunction spatial analyses. *Ecology*, 2006, 87: 2603–2613
- 72 He J Z, Ge Y. Recent advances in soil microbial biogeography (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2007, 28: 5571–5582 [贺纪正, 葛源. 土壤微生物生物地理学研究进展. *生态学报*, 2007, 28: 5571–5582]
- 73 Zeng L, Li J, Li T, et al. Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 1809–1822 [曾莉, 李晶, 李婷, 等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化. *地理学报*, 2018, 73: 1809–1822]
- 74 Li C Y. Study on key-segment and evaluation of natural reserve for ecology with a case for Labagoumen natural reserve in Beijing (in Chinese). Doctoral Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007 [李朝阳. 自然保护区生态关键地段识别与生态适宜性评价研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 2007]
- 75 Li Q R, Liu H. Eco-risk analysis of land use based on landscape structure (in Chinese). *J Fuzhou Univ (Nat Sci Ed)*, 2014, 42: 62–69 [黎启燃, 刘辉. 基于景观结构的土地利用生态风险分析. *福州大学学报(自然科学版)*, 2014, 42: 62–69]
- 76 Rashidi P, Wang T, Skidmore A, et al. Spatial and spatiotemporal clustering methods for detecting elephant poaching hotspots. *Ecol Model*, 2015, 297: 180–186
- 77 Faridi M, Verma S, Mukherjee S. A novel algorithm of weighted fuzzy spatial association rule mining (WFSARM) for wasteland reclamation. *J Inf Optim Sci*, 2018, 39: 195–211
- 78 Wang Y F, He H L. Spatial Data Analysis (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007 [王远飞, 何洪林. 空间数据分析方法. 北京: 科学出版社, 2007]
- 79 Li X, Yang Q S, Liu X P. Knowledge mining and scenario simulation of urban evolution based on CA (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2007, 37: 1242–1251 [黎夏, 杨青生, 刘小平. 基于CA的城市演变的知识挖掘及规划情景模拟. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37: 1242–1251]
- 80 Wang J F, Ge Y, Li L F, et al. Spatiotemporal data analysis in geography (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2014, 69: 1326–1345 [王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法. *地理学报*, 2014, 69: 1326–1345]
- 81 Chen J, Hu B, Zuo X Q, et al. Personal profile mining based on mobile phone location data (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2014, 39: 734–738 [陈佳, 胡波, 左小清, 等. 利用手机定位数据的用户特征挖掘. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39: 734–738]
- 82 Roth D, Otterstatter M, Wong J, et al. Identification of spatial and cohort clustering of tuberculosis using surveillance data from British Columbia, Canada, 1990–2013. *Soc Sci Med*, 2016, 168: 214–222
- 83 Hagenauer J, Helbich M, Leitner M. Visualization of crime trajectories with self-organizing maps: A case study on evaluating the impact of

- hurricanes on spatio-temporal crime hotspots. In: Proceedings of the 25th Conference of the International Cartographic Association, Paris, 2011
- 84 She B, Zhu X Y, Liu R Q, et al. A rose-diagram based approach for analyzing movement patterns of socioeconomic gravity center trajectories (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2016, 41: 1055–1059, 1092 [余冰, 朱欣焰, 刘汝倩, 等. 利用方向玫瑰图分析社会经济重心轨迹移动模式. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41: 1055–1059, 1092]
 - 85 Richardson D, Castree N, Goodchild M F, et al. *Marston*. International Encyclopedia of Geography. London: Wiley, 2016. 1–17
 - 86 Tang L L, Niu L, Yang X, et al. Urban intersection recognition and construction based on big trace data (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 770–779 [唐陆亮, 牛乐, 杨雪, 等. 利用轨迹大数据进行城市道路交叉口识别及结构提取. *测绘学报*, 2017, 46: 770–779]
 - 87 Konstantinoudis G, Kreis C, Ammann R A, et al. Spatial clustering of childhood cancers in Switzerland: A nationwide study. *Cancer Causes Control*, 2018, 29: 353–362
 - 88 Di K C. *Spatial Data Mining and Knowledge Discovery* (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2000 [邸凯昌. 空间数据发掘与知识发现. 武汉: 武汉大学出版社, 2000]
 - 89 Giannotti F, Pedreschi D. *Mobility, Data Mining and Privacy: Geographic Knowledge Discovery*. Berlin: Springer, 2008
 - 90 Miller H J, Han J. *Geographic Data Mining and Knowledge Discovery*. Boca Raton: CRC Press, 2009
 - 91 Goodchild M F. GIS in the era of big data. *Cybergeog*, 2016, <https://journals.openedition.org/cybergeog/27647>
 - 92 Bian F L, Du J Y, Meng X L. Requirements, applications and challenges of spatio-temporal big data processing (in Chinese). *J Geomat*, 2016, 41: 1–4 [边馥苓, 杜江毅, 孟小亮. 时空大数据处理的需求、应用与挑战. *测绘地理信息*, 2016, 41: 1–4]
 - 93 Wang J Y, Wu F, Guo J Z, et al. Challenges and opportunities of spatio-temporal big data (in Chinese). *Sci Surv Mapp*, 2017, 42: 1–7 [王家耀, 武芳, 郭建忠, 等. 时空大数据面临的挑战与机遇. *测绘科学*, 2017, 42: 1–7]
 - 94 Li D R, Zhang L P, Xia G S. Automatic analysis and mining of remote sensing big data (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2014, 43: 1211–1216 [李德仁, 张良培, 夏桂松. 遥感大数据自动分析与数据挖掘. *测绘学报*, 2014, 43: 1211–1216]
 - 95 Li Q Q, Li D R. Big data GIS (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2014, 39: 641–644 [李清泉, 李德仁. 大数据GIS. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39: 641–644]
 - 96 Liu J P, Zhang F H, Xu S H. Progresses and prospects in geospatial big data for E-government (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 1678–1687 [刘纪平, 张福浩, 徐胜华. 政务地理空间大数据研究进展综述. *测绘学报*, 2017, 46: 1678–1687]
 - 97 Liu Y, Kang C G, Wang F H. Towards big data-driven human mobility patterns and models (in Chinese). *Geomat Inf Sci Wuhan Univ*, 2014, 39: 660–666 [刘瑜, 康朝贵, 王法辉. 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)*, 2014, 39: 660–666]
 - 98 Zhu Q, Fu X. The review of visual analysis methods of multi-modal spatio-temporal big data (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 1673–1677 [朱庆, 付萧. 多模态时空大数据可视分析方法综述. *测绘学报*, 2017, 46: 1673–1677]
 - 99 Fu B J. The integrated studies of geography: Coupling of patterns and processes (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2014, 69: 1052–1059 [傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69: 1052–1059]
 - 100 Huang B W. Some main trends in physical geography (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1960, 10: 296–299 [黄秉维. 自然地理学一些最主要的趋势. *科学通报*, 1960, 10: 296–299]
 - 101 Lu D D. New factors and new patterns of regional development in China (in Chinese). *Geogr Res*, 2003, 22: 261–271 [陆大道. 中国区域发展的新因素与新格局. *地理研究*, 2003, 22: 261–271]
 - 102 Leng S Y, Song C Q. Review of land surface geographical process study and prospects in China (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2005, 20: 600–606 [冷疏影, 宋长青. 陆地表层系统地理过程研究回顾与展望. *地球科学进展*, 2005, 20: 600–606]
 - 103 Fu B J. Thoughts on the recent development of physical geography (in Chinese). *Prog Geogr*, 2018, 37: 1–7 [傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考. *地理科学进展*, 2018, 37: 1–7]
 - 104 Yang Q Y, Zheng D, Wu S H, et al. Review and prospects: Integrated physical geography in China since the 1950s (in Chinese). *Geogr Res*, 2005, 24: 899–910 [杨勤业, 郑度, 吴绍洪, 等. 20世纪50年代以来中国综合自然地理研究进展. *地理研究*, 2005, 24: 899–910]
 - 105 Xu X G, Li S C, Cai Y L. Recent progress and prospect of integrated physical geography in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2009, 64: 1027–1038 [许学工, 李双成, 蔡运龙. 中国综合自然地理学的近今进展与前瞻. *地理学报*, 2009, 64: 1027–1038]
 - 106 Li G S, Guo Z C. Methods to evaluate the impacts of physio-geographical pattern on the spatio-temporal differentiation of regional development (in Chinese). *Geogr Res*, 2007, 26: 1–10 [李国胜, 郭兆成. 自然地理格局对区域发展时空分异影响的评价方法. *地理研究*, 2007, 26: 1–10]
 - 107 Peng J, Du Y Y, Liu Y X, et al. From natural regionalization, land change to landscape service: The development of integrated physical geography in China (in Chinese). *Geogr Res*, 2017, 36: 1819–1833 [彭建, 杜悦悦, 刘焱序, 等. 从自然区划、土地变化到景观服务: 发展中的中国综合自然地理学. *地理研究*, 2017, 36: 1819–1833]
 - 108 Fan J, Zhou K, Sun W, et al. Scientific values and research innovations of human-economic geography in construction of ecological civilization (in Chinese). *Prog Geogr*, 2013, 32: 147–160 [樊杰, 周侃, 孙威, 等. 人文-经济地理学在生态文明建设中的学科价值与学术创新. *地理科学进展*, 2013, 32: 147–160]
 - 109 Fang C L, Liu H M, Luo K, et al. Comprehensive regionalization of human geography in China (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2017, 72: 179–196

- [方创琳, 刘海猛, 罗奎, 等. 中国人文地理综合区划. 地理学报, 2017, 72: 179–196]
- 110 Lu D D. The value of geographical science and the feelings of geographers (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2015, 70: 1539–1551 [陆大道. 地理科学的价值与地理学者的情怀. 地理学报, 2015, 70: 1539–1551]
 - 111 Fan J. “Territorial System of Human-environment Interaction”: A theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2018, 73: 597–607 [樊杰. “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, 2018, 73: 597–607]
 - 112 Qian K, Bao W M, Li C S, et al. Application of K-mean cluster analysis in flood forecasting (in Chinese). *Water Resour Power*, 2012, 30: 41–44 [钱堃, 包为民, 李德松, 等. K均值聚类分析方法在洪水预报中的应用. 水电能源科学, 2012, 30: 41–44]
 - 113 Yu B, Meng J M, Zhang X, et al. Segmentation method for agglomerative hierarchical-based sea ice types using polarimetric SAR data (in Chinese). *J Remote Sens*, 2013, 17: 887–904 [于波, 孟俊敏, 张晰, 等. 结合凝聚层次聚类的极化SAR海冰分割. 遥感学报, 2013, 17: 887–904]
 - 114 Shi J J, Yang L, Zeng C Y, et al. Selection of environmental variables and their scales in multiple soil properties mapping: A case study in Heilongjiang Heshan Farm (in Chinese). *Geogr Res*, 2018, 37: 635–646 [史静静, 杨琳, 曾灿英, 等. 土壤制图多目标属性的环境因子及其尺度选择——以黑龙江鹤山农场为例. 地理研究, 2018, 37: 635–646]
 - 115 Shen J P, Wang D Y. Atmospheric correction for case-2 waters based on neural network (in Chinese). *Geospatial Inf*, 2019, 17: 54–57, 11 [沈菊平, 王得玉. 基于神经网络的二类水体大气校正. 地理空间信息, 2019, 17: 54–57, 11]
 - 116 Chen M, Voinov A, Ames D P, et al. Position paper: Open web-distributed integrated geographic modelling and simulation to enable broader participation and applications. *Earth-Sci Rev*, 2020, 207: 103223
 - 117 Granell C, Schade S, Ostländer N. Seeing the forest through the trees: A review of integrated environmental modelling tools. *Comput Environ Urban Syst*, 2013, 41: 136–150
 - 118 Laniak G F, Olchin G, Goodall J, et al. Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future. *Environ Model Softw*, 2013, 39: 3–23
 - 119 Yue S, Chen M, Wen Y, et al. Service-oriented model-encapsulation strategy for sharing and integrating heterogeneous geo-analysis models in an open web environment. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2016, 114: 258–273
 - 120 Belete G F, Voinov A, Laniak G F. An overview of the model integration process: From pre-integration assessment to testing. *Environ Model Softw*, 2017, 87: 49–63
 - 121 Gao Y, Feng Z, Lou F, et al. Application of CGE model in comprehensive research in geography (in Chinese). *Geogr Res*, 2013, 32: 1345–1355 [高阳, 冯喆, 娄峰, 等. CGE模型在地理学综合研究中的应用. 地理研究, 2013, 32: 1345–1355]
 - 122 Cheng G D, Xiao H L, Fu B J, et al. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2014, 29: 431–437 [程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 黑河流域生态——水文过程集成研究进展. 地球科学进展, 2014, 29: 431–437]
 - 123 Song C Q, Leng S Y. Some important scientific problems of integrative study of Chinese geography in 5 to 10 years (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2005, 60: 546–552 [宋长青, 冷疏影. 21世纪中国地理学综合研究的主要领域. 地理学报, 2005, 60: 546–552]
 - 124 Jin W L, Cai L. New understanding of holism (in Chinese). *J Renmin Univ China*, 2007, 21: 2–9 [金吾伦, 蔡伦. 对整体论的新认识. 中国人民大学学报, 2007, 21: 2–9]
 - 125 Li W M. Variations in frequency of winter extreme cold days in Northern China and possible causalities (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019 [黎文懋. 中国北方冬季极端低温频次主要模态及可能的成因. 硕士学位论文. 南京: 南京信息工程大学, 2019]
 - 126 Li F Z, Zheng X T. Assessment of Eastern Pacific ITCZ dipole mode simulations by CMIP5 multi-models (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2020, http://journal15.magtechjournal.com/Jwk3_rdhxb/CN/10.11978/2020034 [李馥孜, 郑小童. CMIP5多模式对东太平洋ITCZ偶极子模态模拟能力的评估. 热带海洋学报, 2020, http://journal15.magtechjournal.com/Jwk3_rdhxb/CN/10.11978/2020034]
 - 127 Zhang X L, Fu D Y, Liu D Z, et al. Study on marine environment of the tuna purse seine fishery in Western and Central Pacific based on EOF analysis (in Chinese). *J Mar Sci*, 2019, 37: 81–94 [张小龙, 付东洋, 刘大召, 等. 基于EOF分析中西太平洋金枪鱼围网渔场的海洋环境. 海洋学研究, 2019, 37: 81–94]
 - 128 Zhou L F, Meng Y B, Lu C, et al. Stochastic simulation of multi-site precipitation field by empirical orthogonal function analysis and Hilbert-Huang transform (in Chinese). *J Beijing Norm Univ (Nat Sci)*, 2019, 55: 263–271 [周凌峰, 孟耀斌, 逯超, 等. 基于EOF和HHT的多站点降雨场随机模拟方法研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55: 263–271]
 - 129 Song C Q. On paradigms of geographical research (in Chinese). *Prog Geogr*, 2016, 35: 1–3 [宋长青. 地理学研究范式的思考. 地理科学进展, 2016, 35: 1–3]
 - 130 Hao Z X, Geng X, Liu K B, et al. Dryness and wetness variations for the past 1000 years in Guanzhong Plain (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 2399–2406 [郝志新, 耿秀, 刘可邦, 等. 关中平原过去1000年干湿变化特征. 科学通报, 2017, 62: 2399–2406]
 - 131 Huang W, Liu C, Cao J, et al. Changes of hydroclimatic patterns in China in the present day and future. *Sci Bull*, 2020, 65: 1061–1063

Summary for “地理综合研究方法的发展与思考”

Development overview and some thoughts on geographic synthesis

Guonian Lü^{1,4,5}, Chenghu Zhou^{2,4}, Hui Lin³, Min Chen^{1,4,5*}, Songshan Yue^{1,4,5} & Yongning Wen^{1,4,5}¹ Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;² State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;³ School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;⁴ Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China;⁵ State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China* Corresponding author, E-mail: chenmin0902@163.com

The geographical system can be recognized as a giant complex system, and the comprehensive study of geography is of great importance in understanding the complex geographical system as a whole. With the rapid development of geographical research, geographic synthesis has become the fundamental task of geographical innovation and breakthrough in the new era. The development of theoretical methods of geographic synthesis has become a critical way to prevent the hollowing out of geography and establish the core theory of geography. However, the conventional practice of geographic synthesis prefers to “divide first and synthesize last”, which formed the dilemma of “easy to divide but difficult to synthesize”. Therefore, the system of geographic synthesis method requires further exploration. From the perspective of geographical cognition, analysis, and synthesis, this paper summarized the state-of-art research and methods of geographic synthesis, identified the root causes that hinder the development of geographic synthesis methods, and puts forward a new conception of developing the method of geographic synthesis research based on “geographic modal”. Compared to the modal and modal analysis methods in the domain of structural systems, geographic modal, as the description form and expression mechanism of regular cognition of the geographical system, is a higher-level abstract carrier than geographical elements and processes. This paper analyzed the characteristics and composition of geographic modal. Based on the regular geographical cognition of spatial patterns, evolution processes, and interaction mechanisms, the integrated and systematic cognition of the geographical system can be formed by the organic aggregation and orderly iteration of multilevel geographic modals. This strategy is expected to benefit the comprehensive research and model reconstruction of the geographical system. This paper aims to sketch a full-stage pathway of geographic synthesis research to address two scientific problems: (1) How to use the overall characteristics of geographic modal to construct cognitive models and representation methods of geographic synthesis, and (2) how to construct detection, analysis and aggregation methods of geographic modal based on the structural characteristics of geographic modal. The research method of geographic synthesis based on the geographic modal will open a two-way channel from fragmental geographical cognition to comprehensive geographical cognition. In addition, modal-based geographic synthesis can be employed to construct new methods to step from geographical data to geographical law and further to comprehensive geographical cognition. This study potentially promotes the collaborative evolution of theories and methods of geographic synthesis, and it is also expected to facilitate the development of geographic synthesis research.

geographic synthesis, geographic modal, geographic rule, geographic analysis, geographic modelingdoi: [10.1360/TB-2020-0799](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0799)