

程维明, 宋珂钰, 周成虎, 等. 地貌信息图谱研究述评与展望[J]. 地球科学进展, 2022, 37(7): 661-679. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.037.
[CHENG Weiming, SONG Keyu, ZHOU Chenghu, et al. Commentaries and prospect on the geomorphic information spectrum[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(7): 661-679. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.037.]

地貌信息图谱研究述评与展望*

程维明^{1,2,3,4}, 宋珂钰^{1,2}, 周成虎^{1,2,3,4}, 汤国安^{3,5}

- (1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,
江苏 南京 210023; 4. 中国南海研究协同创新中心, 江苏 南京 210093;
5. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要:从地貌信息图谱概念的起源——地学信息图谱开始介绍, 论述了地貌信息图谱的概念与发展历程, 从具体研究的角度归纳了包括地貌形态特征图谱(地面坡谱、剖面谱、二维格局谱系、地形纹理谱)和地貌发育谱在内的地貌信息图谱研究类型及研究现状。结合遥感、计算机和人工智能等技术的发展, 分析了知识图谱与信息图谱结合的研究方法在未来地貌研究中的前景, 总结了地貌信息提取、地貌信息分类和地貌制图等地貌信息图谱关键技术研究进展, 并从构建完备的地貌信息图谱体系、提升地貌信息图谱关键技术、加强全球地貌格局与演变的精细化与定量化研究三方面对未来地貌信息图谱的发展进行了展望, 以期为地貌研究工作的数字化、信息化和智能化提供参考, 进而服务于国家资源环境重大战略并推进地貌学科的发展。

关键词:地学信息图谱; 数字地形; 知识图谱; 自动分类; 地貌制图

中图分类号: P931 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2022)07-0661-19

1 引言

地貌是自然地域综合体的主导要素, 它直接影响甚至决定着其他要素的空间分布特征, 是地理学研究的核心与基础内容之一。在我国实施生态文明建设和精准扶贫政策以及“一带一路”倡议的关键时期, 全面、系统地掌握各种资源的分布与环境的变化意义重大, 其中地貌条件是生产建设及环境修复等的基础性和控制性要素。地貌信息图谱是在陈述彭提出并积极倡导的地学信息图谱方法论的框架下, 采用图形思维中的抽象概括方法和信息分析中的数据挖掘方法, 以数字地图、统计图表或图像的形式来反映地貌科学时空信息规律的方法论。通过梳理和构建地貌信息图谱体系,

可理清地貌学学科分类体系的内涵和外延, 掌握地貌研究的形态、成因、物质、过程和年龄五大要素的有机组合方式, 为实现地貌类型的自动分类与制图提供有效途径, 为国家战略提供本底支撑。

因此, 论述地貌信息图谱的起源发展, 总结其理论结构和基本技术手段的研究进展, 展望地貌信息图谱的未来发展趋势, 对于推动地貌学研究的数字化、信息化、智能化发展以及地貌信息图谱理论应用的进步具有重要意义。

2 地学信息图谱内涵及研究进展

地学信息图谱是以地球空间信息认知为基础, 结合我国传统地理研究成果与现代卫星遥感、地理

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2022-06-14.

* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“基于地貌信息图谱的地貌类型分类与制图研究”(编号: 42130110)资助。

作者简介: 程维明(1973-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 主要从事数字地貌与行星地貌研究. E-mail: chengwm@reis.ac.cn

信息系统技术、信息网络、计算机制图和虚拟现实等技术的一种时空复合地球信息科学理论^[1-2]。地学信息图谱实现了形(地图、影像、表格等)、数(量化的模型与方法)、理(机理、规则、知识等)的有机结合^[3-4],利用图形的抽象概括表达形式和数学模型的数理解析方法来归纳揭示地理现象的三维空间结构特征与时空变化规律^[5]。地学信息图谱概念的提出至今已有 20 余年,其被地学相关学科,如土地利用、城镇城市研究、生态环境保护、水系研究和地貌制图等广泛应用的同时,其内涵也在不断丰富发展。

2.1 起源及内涵

陈述彭、潘云鹤和钱祥麟受马骏如在 1997 年“香山科学会”上的提问启发,牵头组织了以“地球信息科学”为会议主题的第 88 次香山科学会议,首次提出“地球信息时/空图形谱系”的研究问题^[2,6-7]。此后,陈述彭围绕地学信息图谱理论框架的建立和展望,发表了一系列文章及著作,进一步补充完善了地学信息图谱内容。

2001 年陈述彭在《地学信息图谱研究》一书中,对图谱、地学图谱和地学信息图谱的概念做了界定^[3],后续研究人员也对相关概念做了相应的补充完善。“图谱”顾名思义为“图”和“谱”的有机结合体,既包括图像和图解的图形表达形式,也兼具不同事物特征的规律性编排,是综合物体空间形态特征和时空序列变化规律的一种显示方式^[8];地学图谱是能反映地学空间分布规律并按照一定递变方式排列的一系列地图、图表或图像组合^[3];地学信息图谱则增加了信息场的时空特征、分布形态和空间组合研究,对空间信息进行了规律化的可视表达,是计算机化的地学图谱^[3]。

马骏如提出的问题是地理学是否可以借鉴化学元素周期表、基因图谱来发展自身的理论体系。地学信息图谱正是受此启发形成的,在此基础上齐清文^[9]总结出地学信息图谱可借鉴生物基因图谱、戏剧脸谱、指纹图谱、人像脸谱和医学图谱等的特征,达到地学现象识别提炼以及本质外化的目的,以此服务于地学应用。

2.2 应用类型及相关研究

在理论研究方面,相关地学专家也做了系列补充。周成虎等^[10]将图谱定义解读为通过将复杂地学问题多层次分布于二维或多维体上,建立地学现象的图形思维方式,从而认识其内在规律,开展预测研究;廖克等^[8]和陈毓芬等^[11]对地学信息图谱定

义进行了深入探讨,提出了地学信息图谱在数字地球上的模型——地球信息图谱;田永中等^[12]证实了利用地学信息图谱解决多时空、多功能生态系统问题的可行性;陈述彭^[13]提出了地学信息图谱研究的 3 种潜能和优势;齐清文^[9]从谱、图谱和地学图谱角度探讨了地学信息图谱的概念,指出地学信息图谱的三大组成部分和关键因子;张洪岩等^[14]讨论地学信息图谱研究关键要解决的问题;陈燕等^[15]诠释了地学信息图谱的时空维;杨存建^[16]结合共建人类命运共同体和地球科学国际化的战略需求,提出了开展全球地学信息图谱的关键技术与应用研究。

在应用方面,针对不同专业领域和研究对象的差异,地学信息图谱结合不同专业知识有了新的发展。陈述彭^[3]根据图谱的结构功能类型将地学信息图谱分为地带性图谱、空间格局图谱、过程图谱、弦律图谱和区域分异图谱,按照研究对象分为水文图谱、城镇图谱和景观图谱,为地学信息图谱的专业化提供了较为详细多样的发展方向。在此基础上,周江平等^[17]研究了城镇交通信息图谱应用的可能性;陈毓芬等^[11]提出自然景观单要素信息图谱包括地貌图谱、气候图谱、水文图谱、土壤图谱和植被图谱等,其中地貌图谱采用三级区划;叶庆华等^[18]提出了土地利用变化图谱研究方法,对黄河三角洲 40 年土地利用涨势进行分析;张百平等^[19]概括了山地垂直带谱的 7 种变化模式和 5 种生态类型,完善了山地垂直带谱的研究框架;胡最等^[20]从地学信息图谱角度分析传统聚落景观文化特点及其表现方式;骆剑承等^[21]结合遥感图像视觉认知,提出遥感信息图谱。此外,诸多地学专家也对地学信息图谱在生态保护^[22-24]、国土空间利用^[25-27]和环境景观评价^[28]等方面的应用做出了积极的探索。

2.3 发展方向

地学信息图谱名词概念的提出只有短短 20 年,但图谱思维在国内外地理学中的应用早已贯穿于地理学的发展之中,魏格纳大陆漂移、柯本气候区划、杜能地理区位论和李四光大地构造学说等都是其中的突出代表^[3]。在计算机广泛应用、数据爆炸式增长和地学信息图谱理论日趋完善的今天,除了要继承大师们在地学理论的图谱式创新思维的同时,还应结合时代特征,合理迁移计算机、物理、数学领域的前沿成果和技术手段,搭建基础平台,在保障硬件措施的基础上完善管理模式,关注模型开发/虚拟现实技术^[29],结合海量数据处理分析技术,提升多尺度和模糊地理的相关问题的解决能力。

3 地貌信息图谱起源及概念

地貌学作为地学分支学科,吸取了地学信息图谱运用图形语言进行时空表达的分析模式,通过数字地形图的绘制,综合地貌要素特征和组合方式,结合地貌机理挖掘,构建地貌信息图谱,实现了地貌知识的规律性总结和迁移应用。地貌信息图谱立足于地球信息科学,是地貌学的一次显著的理论与方法创新,也是地学信息图谱在地貌方面卓有成效的实践探索^[30]。

3.1 地貌

地貌学(geomorphology)的概念于1858年首次被提出^[31],之后其定义随着研究的深入被不断完善。周成虎^[32]在《地貌学辞典》中将地貌的概念表述为“地球表面的起伏形态”,地貌学则是主要研究地表形态特征及其变化过程的学科。最新版《地图学术语》^[33]的国家标准中,地貌被定义为“地球表面起伏形态的总称”。

早在地貌的定义出现之前,中国古人在劳动中也积累了丰富的地表形态知识,对地貌学有了一定的认识。最早可追溯到4 200年前的地图——《山海经》及其地理考察报告——《五藏山经》,表明当时人们曾组织过地理考察和测量绘图工作。尽管早期中国地貌学多为定性的现象描述和归纳总结,且详于山而略于水,但也对当时中国的农业生产、军事政治和环境治理等起到了指导作用,更为中国古代地貌学的研究做出了基础铺垫^[32,34]。

地理大发现引领了地球探索的新时期,西方学者在地质学方面进行了大量的探讨。Gilbert发表的亨利山地质报告提出了均衡发育的思想,标志着近代地貌学理论的开始^[35]。1889年戴维斯发表了《地貌循环》,1924年彭克完成了《地形分析》,这一时期西方出现了一系列地貌专著^[36-37]。20世纪50年代开始的计量革命有力地推动了地貌学从定性走向定量。数学、物理、遥感、计算机、生物化学领域先进理论和技术经验的大量引进,使得地貌学发展迅速,相关分支领域不断精细化,相继发展了构造地貌学、动力地貌学、环境地貌学、河流地貌学、气候地貌学、旅游地貌学和行星地貌学等^[34,38]。同时,面对全球环境变化等全人类共同的科学问题,地貌学与全球性重大科学计划和国家战略紧密结合,继续发展其联系地质学、地理学和气候学的交叉学科功能,深入揭示地表过程和格局变化,以地貌过程研究综合气候、水文、生物和土壤环境要素的分布格局,进而为掌握地球资源分布与环境变

化、揭示地球地貌的时空格局及其动态演变规律提供了技术手段,为经济建设及环境保护提供科学支撑。

3.2 地貌信息图谱概念及其起源

地貌信息图谱是在陈述彭的地学信息图谱基础上发展衍生出来的,与地学信息图谱相似,地貌信息图谱也利用图形语言综合地貌时空信息,综合“形”、“数”、“理”全局关系,通过特征提取、类型划分和图谱关联等一系列的分析方法,发掘不同研究区域地貌演化进程中的个性与共性、相似性与异质性,探究地貌整体与局部、微观和宏观过程以及表象与机理之间的联系,最终将地貌演化发育进程的主次矛盾、核心与辅助要素、外在表象与内在机理、驱动与随动因子等多方面的科学问题揭示出来,以达到对地貌形态、成因、物质、过程和年龄五大要素的全面认识,实现对地貌及演化特征深入、系统且全面的知识发现^[39]。地貌信息图谱思想,使得无论是地表实际的地貌形态和地貌类型,还是其背后隐藏的地貌信息和地貌规则,都可以通过抽象、概括、综合的图形思维去实现更深层次的科学凝练以及转化和多维显示,以获得更加简洁的规律性理解。

地貌学的图谱思维渗透于地貌学的发展全历史,如中国的《山海经》对地貌的描述集中于图形表达方面,《千里江山图》表达地貌的同时还兼具艺术造诣,另外还有Thagard^[40]绘制的大陆漂移学说图解和李四光^[41]提出的大地构造模式等。由此可知,地貌信息图谱的内涵与外延一直为中外学者所使用,并在一定程度上推动着地貌学的发展,不过当时对地貌信息图谱研究缺乏系统的体系和理论框架的支撑。1998年地学信息图谱提出之际,陈述彭^[42]就阐述了其在地貌学的应用方向,此后地貌学者纷纷加入地貌信息图谱的理论研究和方法应用中,其中以黄土高原地貌形态研究^[43-45]和山地垂直带谱^[46-47]的研究最具代表性。

4 地貌知识图谱与信息图谱的关联与展望

知识图谱是一种用节点和连线分别表示实体与实体关系的结构化知识的图形表达^[48],主要聚焦于基于自然语言处理和深度学习等技术的方法,其最为强大的功能是它们所支持的逻辑推理功能。

4.1 知识图谱的起源与发展

知识图谱起源于20世纪50年代末60年代初

提出的语义网(semantic networks),主要用于自然语言理解领域^[49]。70年代产生了专家系统(expert system)^[50],80年代哲学领域的本体论被引入到计算机模型中^[51],1989年Tim等创建了万维网^[52],1998年Tim等^[53]又提出了语义互联网(semantic web)的概念,2006年链接数据(linked data)的四象原则被提出^[54]。2012年谷歌公司提出面向知识智能搜索的知识图谱(knowledge graph)概念^[55],随后知识图谱在微软、Facebook等应用中广泛推广。目前知识图谱在实体、属性的关系抽取,知识对齐、融合、表示和补全等方面有了较多成果,在个性化推荐、智能问答和语义搜索等方面得到广泛应用^[56]。

当前的知识图谱有结构化文本、特定领域知识库、链接开放数据和百科类网站知识图谱等几种类型。Cycorp数据库是Lenat在1984年创建的,目标是建立人类最大的常识知识库,目前有50万条术语和700万条断言,Wordnet是普林斯顿大学认识科学实验室在1985年开发的词典知识库,主要用于词义消歧,另外还有conceptNep、Freebase、WikiData、DBpedia、YAGO、BabelNet、NELL、Concept Graph、OpenKG、cnSchema、Zhishi.me、GeoNames、Google知识图谱、维基百科、Probase、搜狗知立方和百度知心等大型知识图谱。

4.2 地貌知识图谱的现状与展望

地理学是研究地理要素空间分布及其演化规律的学科,知识图谱的应用可在一定程度上满足地理学研究的综合性和交叉性要求,丰富地貌学研究的范式。因此,地理学家将知识图谱引入地理学领域,以实现地理知识检索、推理和计算,称之为“地理知识图谱”^[57-58],其中将网络的地理信息转化为知识图谱表达的相关研究的应用最为广泛,地理语义网的代表性成果有Geo-Names Ontology、OSM Semantic Network、Linked-Geo Data和Geo Word Net等^[59]。

在地球科学知识图谱的构建与应用方面,目前有大约20个欧洲国家参与的共享地质图服务OneGeology-Europe项目^[60],美国国家科学基金发起“地球立方”项目在地球科学词汇和知识图谱等方面取得了最新进展^[61],国际地质科学联合深度时间数字地球(Deep-time Digital Earth, DDE)大科学项目搭建了自己的平台,耦合四大圈层海量、异构数据,进行知识图谱构建和服务^[62]。在方法研究方面,有学者已经在地理学实体、地理学关系抽取^[63-64]以及地理学知识融合表示与补全^[65-67]等方面取得了系

列进展。

地貌知识图谱是将地貌形态特征、成因机理、分布格局及其演变规律等地貌研究内涵进行知识的重新架构和表达,形成地貌信息的语义网络,实现碎片化地貌知识的有机关联,从而获得一种更深层次的、体系化地貌知识的地理知识图谱。在地貌信息本体构建、地貌语义信息提取、地貌过程信息关联和地貌知识图谱构建中实现地貌本源认识、信息表达、知识生成、过程揭示和问答推理等功能。在上文提到的DDE等地理学知识图谱项目中地貌知识作为子学科组成部分,但是由于地理学知识图谱刚刚起步,且地理学子学科知识相关性较高,目前的知识图谱建设大都以地理学整体为研究对象,其中包含地貌的数字地形、流域、黄土地貌、喀斯特地貌、人工地貌和滑坡地貌等知识内容。

与地理学信息图谱相比,地理学知识图谱是作为开放语义网的一个子集^[68],它提供了很有应用前景的数据组织模式,其核心是得到知识库,实现知识的推理和检索应用^[69-70],而地理学信息图谱是将专家的地理学知识抽象表达,通过时空模型的构建,起到重建过去和虚拟未来的作用,地理学知识图谱的加入给地理学信息图谱提供了大数据时代新的发展思路,将使地理学信息图谱的构想更加切实可行^[57]。当前地貌信息图谱蕴含的地理学知识相当程度上丰富了地貌知识图谱的知识来源,而知识图谱的可视化连接也为地貌知识的关系表达提供了新途径。因而将地貌知识图谱思想融入地貌信息图谱研究,有助于通过语义网络实现地貌学相关内容的关联性检索,为地貌知识的认知与挖掘提供了新的范式。

5 地貌信息图谱研究类型及进展

地貌信息图谱在地貌研究各个方向均有广泛应用,从典型区域来看,中国黄土高原^[43-45]、青藏高原^[71-73]和喀斯特地区^[74-75]等因其独特的地貌形态、地表物质组成和各具特色的空间分异规律,成为地貌信息图谱研究的典型区。随着空间技术的发展和地球科学向行星科学的扩展^[76],近地星体的地貌研究备受关注,月球探测器的大量发射和航空摄影技术的发展,使得月球整体数据质量高、类型全面,为月貌研究提供了丰富的资料,月貌信息图谱研究也成为地貌信息图谱的典型^[77-78]。

从目前已发表的文章和已出版的著作来看,地貌信息图谱的类型根据分析的角度不同大致分为地貌形态特征谱和地貌发育谱两类。其中地貌形

态特征谱又可分为地面坡谱、剖面谱、二维格局谱系和地形纹理谱,主要从地表形态分析角度对地貌进行分类描述。“形态”作为“形态、成因、物质、过程和年龄”这些地貌要素之首,既是地貌特征的一类,也是5类要素综合作用的结果展现,是地貌信息图谱分类研究的重要依据,因而地貌形态特征谱成为了地貌信息图谱研究的主流。地貌发育谱是地貌信息图谱构建的理论基础,通过综合考虑地貌的成因机理特征,采用面积高程积分、地貌继承性研究以及地貌不同空间个体类型代替个体时间演化——地貌“空代时”等研究方法反映地貌发育和演化过程,对于了解环境变化历史、预测未来全球变化形势有重要意义^[30]。

5.1 地貌形态特征谱

5.1.1 地面坡谱分析

地面坡度是通过量化、指标化描述地面坡度来衡量地面倾斜程度大小的基本度量^[79],可综合反映地貌宏观、中观和微观等不同等级的形态特征谱系。然而地面坡度具有空间的连续性,很难有效判定区域尺度的地貌类型,因而科学合理的坡度分级体系对地貌研究有重要意义。地面坡谱是在特定区域构建不同级别坡度所对应的相对面积与地面坡度特征关系的统计图表或数学模型^[80],在此基础上发展的基于坡面单元的坡谱指数,有效地刻画了地貌形态特征的变化规律^[81]。李发源等结合前人研究经验^[82],将Shannon^[83]的信息熵理论引入地面坡谱研究,从宏观上定量反映不同比例尺数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)地形信息变化情况,分析了坡谱信息熵的空间分异性^[84]。另有以坡谱及其特征指标作为描述地形特征的定量因子,进行地貌类型识别等研究^[85]。目前,地面坡谱研究多集中在黄土地貌研究中,且存在很大的不确定性^[86],未来可以进一步探索完善并在其他类型地貌中推广应用。

5.1.2 剖面谱分析

地形剖面是反映区域地貌特征的重要手段^[87],大尺度上的地形剖面可显示整体区域的起伏情况,如我国西高东低、三级阶梯的地势特征可以由我国东西走向地形剖面图来显示^[88]。针对小尺度的河流和山脉等研究对象,地形剖面可以充分展示其形态分布进而对其发展演化规律进行分析。如Hack提出并利用坡降指标来定量反映河流纵剖面坡度的变化特征,通过不同尺度的坡降指标及剖面图研究河流的剖面形态,反映其不同的地貌信息^[89],随

后横纵剖面应用逐渐成为河流形态分析的重要内容^[90-92],结合河流梯度指数、陡度指数、分层曲线和非对称因子等系列分形指标,可实现对河流地貌较为全面的形态描述^[93]。对山脉的研究中,Fielding等^[94]统计条带剖面段生成的最大高程、最小高程和平均高程剖面,推导青藏高原地质变动规律。山地的垂直带谱本质上也是一种山地剖面谱,结合生物特征被赋予生态研究色彩。张百平等^[19,46]基于山地基本地理信息单元的空间结构特征,对山地垂直带信息图谱进行研究,并构建了地貌类型垂直分布的模式;Xiao等^[95]基于DEM数据,在监督分类下提取了西昆仑山数字垂直带的时序谱,有效实现了垂直带的数字化识别。与山地相比,沙丘的物质组成相对单一,形态起伏是其主要地貌特征,其剖面谱几乎成为沙丘研究的必备手段,研究常利用沙丘剖面谱结合沙丘脊线、峰部、趾部位置及坡度、坡向等形态特征作为模型构建与沙丘发展的推演依据^[96-97]。

以上剖面谱的单幅剖面图多为沿单一方向直线剖出,显示单一方向的地形起伏变化状况,边界剖面则是围绕不规则物体边界,化曲为直竖剖地物,得到地物的边界图谱。如吴瑞等^[87]研究了中国陆地边界地形剖面谱的绘制方法,并在地形剖面基础上叠置了气候区划、土壤区划、植被区划和民族分布,直观反映了中国陆地边界地形走势及人物自然要素的沿线分布情况。在原有坡谱基础上提出的流域剖面谱,一定程度上避免了地形剖面的各向异性^[98],目前在黄土地貌研究中应用相对较为广泛^[99]。

在剖面提取方面,学者也做了相应探索,阚琬珂等^[100]用ArcView的Avenue语言开发了带状剖面工具,实现带状剖面图自动绘制,有助于带状剖面地形空间关系分析;邹斌文等^[101]利用ArcGIS软件,对三峡地区SRTM-DEM数据进行了条带剖面提取方法研究,实现了条带剖面的快速准确提取。

5.1.3 二维格局谱系分析

地貌的二维格局主要是指地物在空间俯视图情况下的形状及景观格局类型,如閻国年等^[102]提出的基本河网格局谱系共包含8个河网类型,现在已被广泛认可,基于不同的节点数抽象出的谱系图有所差异。回顾河流格局谱的发展历程,1945年Horton提出了著名的水系结构组成定律,即Horton水系分级定律,用以表达水系的等级和结构数量关系,1952年Strahler进一步发展了该定律^[103],20世

纪 70 年代分形几何学产生之后^[104],地貌学家致力于寻找 Horton 定律与分形思想的内在联系^[105-106], la Barbera 等^[107]经过研究将 Horton 水系分级定律和 Hack 定律隐含的分形性质分析出来,此后河网格局谱研究向着定量化、指标化方向发展。姜永清等^[108]和龙腾文等^[109]研究了黄土高原流域水系的 Horton 定律和水路网分形状况,杨凯等^[103]探讨了感潮河网地区的水系结构特征及城市化响应,张艳如等^[110]通过对陕西省延安市燕沟流域水系的研究验证了分形维数法与传统地貌法判断的一致性, Jacek 等对分形河网扩散受限聚集 (Diffusion-Limited Aggregation, DLA) 模型进行了改进^[111-112], 河网水系的格局谱已成为较成熟的研究方向。

除水系外,二维格局谱系在地貌研究的其他方面也有广泛应用,如纪翠玲等^[43]对黄土高原正负地貌分别构建了形态谱系,研究地貌形态信息的平面形态标准样式和组成结构;叶庆华等^[18]利用地貌信息图谱的思想对三角洲变化进行研究,提出了基于黄河三角洲的淤长、基于长江岸线变化等的图谱体系。

5.1.4 地形纹理谱分析

地形纹理是指在一定空间尺度上,同类地貌形态结构相似,不同地貌相异,近周期性变化的一种自然纹理,体现了地物的内在属性^[113]。基于地形纹理整体与局部的层次结构,可实现地貌特征的自动提取和地貌类型的判别,揭示地貌发育的空间演化规律^[30]。在地貌的应用上,常采用对 DEM 派生出的各类地形因子组成的数字矩阵的形态模式进行分析^[98]和对遥感影像的地面纹理分析^[114]这两种方式。纹理分析方法在区域地貌学中被归类为信息图谱分析方法^[115],刘凯等^[116]研究发现相较于影像,DEM 不受地表覆盖物的影响,对地形本质特征反映更为直接;Ding 等^[117]利用灰度共生矩阵计算地形纹理,证实了稳定性单元可作为地域地形的尺度;Xu 等^[118]选取青藏高原西南地区的典型地形,采用离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 作为纹理特征分析方法,结果表明小波变换的纹理特征能够获得较高的分类精度;Qiu 等^[119]使用了地形纹理生成模型 (Terrain Texture Generation Model, TTGM),来填充 DEM 数据中的空洞。

5.2 地貌发育谱

地貌发育图谱是地貌信息图谱构建的理论基础。上述的形态特征谱,很多最终也服务于地貌的

发育演化过程的推导,二者并不能完全割裂开讨论,只是相较而言,地貌发育谱更多关注的是地貌不同发育阶段的机理演化,地貌形态特征谱则将研究重点放在地貌的形态特征提取,虽然不同的特征之间存在演变关系,但并不是研究的重点讨论问题。

了解地貌发育过程,对于地球环境演化和地表生态系统监测保护有重要意义,然而地貌发育是一个长期缓慢的动态过程,常常是模糊非线性的,部分学者采用元胞自动机研究土地利用变化、沙丘演化和地质变动等^[120-122];部分学者利用环境考古学推演地质地貌发展历程^[123-124],然而由于在宏观上地貌演化往往是多因素叠加的效果,因而在大区域上元胞自动机的模拟效果很难理想,环境考古学可以对几个地点进行检验性考察,但对于宏观地貌发育研究需要大量人力物力,也并不具有普适性。

针对地貌的发育演化,地貌学家做了大量理论研究。其中比较突出的 3 种理论为:基于面积—高程积分的地貌发育进程理论、地貌继承性 (landform inheritance) 理论和地貌发育演化的“空代时”方法^[30]。

戴维斯侵蚀循环理论是阐述地貌发育阶段的经典理论,1952 年美国地貌学家 Strahler^[125]借助流域高程分析法,通过计算面积—高程积分曲线形态及积分值来划分地貌发育的不同阶段,定量地描述地貌的侵蚀循环机制,之后国内外学者在面积—高程积分方面做了大量的实践探索和理论研究。励强等^[126]在面积—高程积分基础上发展了侵蚀积分,从侵蚀的角度重新对流域发育阶段进行了特征分析;艾南山^[127]受 Leopold 和 Langbein 的地貌学熵的启发,将面积—高程分析法和信息熵原理结合提出地貌系统信息熵;信忠保等^[128]探讨了面积高程积分与 DEM 分辨率、分析窗口间的尺寸效应,完成了黄土高原高程积分值的空间分异图。此外, Walcott 等^[129]、Korup 等^[130]和祝士杰等^[131]分别利用面积—高程积分曲线对非洲东南部盆地、青藏高原和黄土高原的地貌发育阶段进行了研究,充分体现了面积—高程积分在地貌发育研究中的应用价值。

地貌继承性是指在地貌发育过程中,后一阶段地貌形态的形成对前一阶段地貌特征的承袭关系^[132]。加柯克斯在 1977 年提出,喀斯特的地貌变化对该地区的地貌发育有反馈作用,威廉姆斯等^[133]研究了塔状喀斯特的类型划分及其继承性发育规

律。在黄土研究方面,Xiong等^[134]绘制了古今地貌继承性变化对比图,发现现今黄土地形和古地形有明显的线性正相关关系。另有学者对冰川侵蚀现象进行研究,证实了冰川地貌的继承性现象^[135]。

由于地貌的演化通常是以百年千年为单位的,相较于研究人员的生命周期来说,地貌发育研究很难做到在足够长的时间观测,而由同一成因造成的小区域地貌由于各个对象发育条件、地理位置、物质组成与环境因素的相似性,单就发育起始时间不同产生的差异,可用在同一观测时间下,处于不同发育阶段的不同地貌个体表征同一地貌个体在不同发育时间阶段的形态,即演化空间代替时间(space-for time substitution)方法,以下简称“空代时”方法。“空代时”方法的应用将地貌演化的时间序列谱转化为空间系列谱的研究,在保证数据源的同时大大降低了研究难度。基于“空代时”方法,业内学者在构造地貌^[136-137]和河流地貌^[138-139]等方面开展了系列相关工作,促进了地貌发育演化的过程机理解释。

6 地貌信息图谱研究关键技术及进展

图谱体系构建是地貌信息图谱的框架,地貌信息提取、地貌信息分类与制图技术是地貌信息图谱构建的关键技术,贯穿于地貌信息图谱应用过程。一方面,当前遥感、地理信息系统、计算机和人工智能等技术的不断发展为地貌信息图谱技术提供了更多的发展机遇;另一方面,面对我国对区域、国家乃至全球资源利用、工程建设、气候变化、人类活动等研究不断深化的时代背景及其掌握的全球地形地貌本底数据,快速实现地貌类型的自动分类与制图的紧迫需求,研究地貌信息图谱关键技术有极大的发展前景与战略价值。

6.1 地貌信息提取进展

地貌信息的提取和指标分析是地貌分类和地图绘制的基础。随着地貌调查方法与计算机技术等不断发展,地貌信息提取方法经历了从专家知识的形态描述与综合分析,到专家知识的综合判别与计算机辅助计算,再到专家知识指导下的人工智能自动提取等不同阶段^[140]。

其中,基于专家知识的形态描述与综合分析的地貌信息获取以野外普查与综合制图为主要特征,起源于野外普查之后采用文字和图画的形式记录地貌信息的技术方法,本质是对地形特征的抽象概

括综合,在前期全球及区域地貌调查与制图的研究历程中发挥了巨大作用,产生了一系列具有代表性的地貌调查与制图研究成果,如美国和苏联的1:400万地貌调查与制图^[140]、中国1:100万地貌调查与制图^[141]、中尺度地貌制图方法^[142]和欧洲详细的地貌制图方法^[143]等。

专家知识的综合判别与计算机辅助计算主要体现在地形的数字化表达上,早期的地形数字化指的是将纸质地形图扫描得到矢量的等高线等,进而在计算机中开展地形特征分析,后期随着计算机在地学应用的推广,专业化程度不断提升,1958年Miller首次提出了DEM的概念^[144],DEM蕴含了丰富的地形结构特征,成为地貌研究的基础与核心数据。同时利用DEM的衍生指标可实现信息图谱的量化、指标化,从而提取挖掘更多的地貌信息。如地势起伏度^[145]、坡度^[79]、粗糙度^[146]和流域圆度比^[147]等基础地貌指标能够直接从DEM中计算获得,可综合反映地貌宏观、中观、微观等不同等级的形态特征谱系,后期学者针对不同方面的应用提出沟壑密度、地表切割深度、地形复杂度指数和地形动力因子等一系列地形因子,不仅描述了地表形态的基本几何特征,而且融合了物理学与地学内涵^[144]。此外,通过构建综合指数方法,可反映地貌形态的变化特征^[148-149]。

专家知识指导下的人工智能自动提取与第二阶段的专家知识的综合判别及计算机辅助计算的差别在于,第二阶段计算机主要用于特征的计算,而第三阶段专家知识指导下的人工智能提取是计算机通过人工算法编程,自动得到地貌信息,代表性应用如间国年等^[150]通过提取沟谷网络,最终实现沟沿线的自动提取;肖飞等^[151]利用DEM数据,提出山体界限自动提取的方法;龙恩等^[152]将基于计算机的自动提取及知识的专家修正结合起来,探讨了自动半自动的地貌单元提取方法;Sreekesh等^[153]和Bamdadinejad等^[154]研究了海岸线的提取方法。目前利用人工智能自动提取的地貌信息主要是指线性地貌边界,地貌指标还是以专家理论提出计算机计算为主,单靠机器自动学习的特征而进行的分类存在一定的黑箱问题,容易落入“数字游戏”中,失去地理学解释自然的“初心”,所以现在大部分研究还是以半自动为主。

6.2 地貌信息分类进展

地貌学以地表形态格局和变化过程为主要研究内容,如何将地貌要素有机综合,并进行地貌类

型的划分一直是地貌学研究的科学问题。地貌学家 Rhoads 等^[155]也指出地貌分类体系的构建是地貌学研究的核心理论基础。

目前,国内外学者普遍认可的是形态与成因相结合的地貌分类方法^[156-160]。现有研究多以地貌形态与成因等特征的统一体理论为指导,利用 GIS 分析等方法,结合 DEM 与地质数据等,进行典型地貌类型的划分。例如 Kreslavsky 等^[161]利用月球地形粗糙度等形态特征综合划分月球地质单元;Pipaud 等^[162]应用均值漂移分割和支持向量机尝试解决复合形态冲积扇的分类问题;Yang 等^[163]利用多源 DEM 数据,对喀斯特峰林和峰丛地貌单元进行分类。针对不同尺度的研究对象,因其反映内容及制图的侧重点不同,采用的分类方式各异,如在洲际乃至全球尺度地貌分类体系中,多体现板块构造和宏观的形态及成因;在国家及区域大、中尺度地貌分类中,多反映中微观地貌的形态与营力作用^[164-165]。分析表明,现阶段地貌的成因特征识别研究多集中在典型地貌类型方面,现有的方法及应用在大范围地区地貌成因分类中仍有很多不确定性及难点。

信息时代的遥感、地理信息系统、计算机与人工智能等技术的发展实现了大数据背景下的多源地理信息获取计算及各类信息与知识体系的快速构建,推动了地貌分类技术方法的升级发展,为地貌分类提供了强有力的技术支撑。技术层面的进步突出表现在地貌的自动分类方面,自动分类方法在地貌类型的划分应用上可大致分为 2 类:一是通过构建地形模型来实现自动分类,如 Hammond^[166]通过表面斜坡坡度、相对地形起伏度与剖面趋势等数值识别方法实现地貌形态的自动分类;二是通过研究分类算法实现自动分类,多以地貌计量学中的经验性练习来完成^[167],常包括形态结构和几何纹理特征等,如在二维格局谱和地形纹理谱中的应用。此外,人工智能等技术在特定地貌对象的分类和识别方面具有较大的应用前景,如 Liu 等^[168]利用随机森林分类器对月球环形地貌特征的形态及成因进行了分类,Arabameri 等^[169]利用统计和人工智能相结合的方法划分了坡面沟谷侵蚀模式,Zhao 等^[170]应用人工智能技术识别了流域坡面的滑坡体单元,Szabó 等^[171]使用激光扫描数据对比了基于像素和基于对象的机器学习方法在河流地貌分类中的效果,Li 等^[172]利用景观指标、主成分分析法和聚类分析实现干旱区风成河的

分类。

从自动分类的数据源角度分析,单数据源中基于 DEM 自动识别地貌形态特征的算法最多,有 10 多种,可归纳为通过训练样本训练来识别地形类型的监督分类法^[173]和依据输入数据自身特征决定最优分类类别的非监督分类法^[174]两大类。基于多源 DEM 数据进行地貌形态特征分类方法也可归纳为 2 类:一类是对单一地形指标进行分级与分类,如利用地势坡度提取及分级划分不同坡度的地貌类型^[30];另一类是基于多指标综合分析进行分类,如根据沟谷与分水线网络、沟底与沟沿线等特征综合划分台地、阶地和低洼平地等地貌类型^[30,102]。随着高分辨率遥感影像的出现和发展,结合不同的 DEM 数据和图像处理的多源数据综合算法得到了广泛应用,即除了通过地形指标的计算得到地形特征外,同时考虑地质、土壤、植被或水文等信息,依据不同的分类方法和多源信息融合技术,将地貌形态分为不同的类别^[175-176],这使得地貌的综合性得到了充分的体现。然而现阶段诸如内营力、物质组成等很难直接从 DEM 或遥感影像中获取,成因的分析需要结合地质图及专家知识干预。因此,形态与成因相结合的地貌分类自动化方法是未来地貌自动分类的研究重点。

6.3 地貌制图进展

地貌制图是将各种地貌现象的规模、空间分布、分类或分区直观地反映在地图上的过程,它是地貌调查和研究的重要方法和手段,也是对地貌现象文字描述的补充说明^[32]。地貌制图的交叉学科性、基础本底性和特征派生性^[140]决定了其在地学研究中的重要地位。

地貌制图学是地貌研究的主要方向,始终贯穿于地貌学研究中^[177]。自诞生以来,地貌制图经历了人工手绘纸质地图到计算机制图的转变过程,并逐步融入虚拟现实技术^[178],全球对于地貌制图的研究也日渐增多,尤其是典型区域大比例尺地貌图的编制工作对地貌学研究有重要意义^[179]。国际上,从北京地质学院翻译出版的《地貌制图》^[140],到中尺度地貌制图^[142],再到详细地貌制图^[143]等,都对全球及区域尺度的地貌制图方法提出了规定。在洲际及全球制图方面,大范围的地貌制图研究已有诸多成功的案例。如 Smith 等^[177]论述了地貌制图的方法,总结了全球各国在地貌制图研究领域取得的成果。陈志明^[159]编制出版了覆盖地球约 35% 陆地表面的《亚洲与邻区海陆地貌全图》,揭示了基

于板块构造学的亚洲地貌格局的形成与演变机制,周成虎等^[180]在《数字地貌遥感解析与制图》中探讨了中国大陆和海底地貌的分类体系与制图规范等。此外,苏联编制了全国1:400万地貌图^[140],欧洲编制了1:250万地貌图^[140],美国编制了1:400万地貌图^[140]等。我国的地貌制图学研究也紧跟国际发展动态,在地貌制图理论和地貌图的编制方面都取得了一定突破,从1987年中国科学院地理研究所(现中国科学院地理科学与资源研究所)^[141]出版的《中国1:100万地貌图制图规范》,到1993年出版的《1:400万中国及其毗邻地区地貌图说明书·中国地貌纲》^[159]、1994年的《中国地貌图(1:400万)》^[181]、2009年出版的《中华人民共和国地貌图集(1:100万)》^[160],再到2019年完成的中国地貌区划制图^[182]等,都是我国地貌制图学研究领域取得的阶段性成果,有力地推动了地貌制图学的发展。然而全球大比例尺的地貌图尚处于空白状态,随着全球化进一步发展的需要和遥感计算机等科技高速进步的技术推进,目前编制全球性大中比例尺地貌图的条件已经成熟^[179],成为未来地貌制图学重点研究目标。

在全球数字地形制图方面,SRTM、ASTER、ICESat、AW3D等多源和多尺度DEM数据的不断问世^[183],在开展全球地貌制图研究奠定了坚实的基础,基于多源DEM数据进行全球海陆一体化的地貌形态分类与制图研究已取得诸多研究成果。如Drăguț等^[184]应用SRTM-DEM数据,将全球南北纬60°以内区域的地形特征划分为3个等级;Harris等^[185]利用SRTM30_PLUS数据,刻画了海底地貌,将全球海底划分为131 192个地貌类型图斑;Shen等^[186]基于30-arcsec的DEM数据,构建了全球小流域单元近30个特征指标的数字地形信息产品等。随着信息化的不断推进,数字地貌制图大有可为。

7 展 望

地貌信息图谱概念起源于陈述彭的地学信息图谱构想,思想却贯穿于地貌学发展全过程,推动了地貌学信息化发展。众多学者在各类地貌信息图谱体系构建和地貌信息提取、分类和制图等方面做出了诸多探索,取得了许多阶段性成果。但在全球化和信息化的时代背景下,地貌学的理论与技术方法仍需进一步提升,同时,资源利用及环境保护等诸多领域也对地貌学的应用研究提出了迫切的需求。

7.1 亟需构建完备的地貌信息图谱体系

尽管地貌信息图谱已有地貌形态特征图谱(地面坡谱、剖面谱、二维格局谱系、地形纹理谱)和地貌发育谱等类别的发展,并在地貌类型分类体系构建等方面有所应用,但现阶段地貌信息图谱仍存在内容相对简单、谱系不够完善等问题。

从两类主要地貌信息图谱各自的研究特点来说,地貌形态特征图谱中地面坡谱还多集中在黄土地貌研究,其普适性并未在其他地貌类型中得到充分验证,之后的工作可考虑进一步发展迁移,构建适合多种地貌类型的完善的地面坡谱体系;对于地貌形态特征图谱中的剖面谱,现有沿单一方向选取剖面 and 边界剖面两种形式,有大小尺度下的剖面谱类型,有针对河流、山地等不同地貌对象的剖面谱,也有在剖面基础上叠置植被、气候、土壤特征的综合分析方式,针对不同的剖面选取方式、研究范围、研究对象和综合要素,剖面谱的指标选取也千差万别,缺乏统一的标准和一致性的体系。后续需要进一步归结剖面谱类型,挖掘其中的关联,总结规律,使各类型剖面谱相协调;地貌形态特征图谱中的二维格局谱目前也面临着在不同研究对象中发展不平衡的问题,主要应用在河网水系研究中,且内容相对简单,需要进一步设计二维格局谱,增加其可用性和多元化;地貌形态特征图谱中的纹理谱有对地形因子组成矩阵的模式进行分析和对遥感影像的地面纹理分析2种应用,与计算机的模式识别等相关技术结合较为紧密,需要持续跟进技术更新,维持纹理谱系的前沿性和科学性,理论方面也需构建可扩展性较强的纹理谱系结构。

地貌发育谱在地貌形态的基础上,侧重于发展演化的研究方向,其中基于面积—高程积分的地貌发育进程理论,和上述地面坡谱一样在地貌类型上发展不平衡,以黄土地貌研究中的应用为主,需要进一步发展,拓宽其应用的广度;地貌继承性理论目前严格来讲还算不上图谱,单有理论支撑,并未形成自己独特的技术手段和图谱体系,与其他图谱的结合也不够紧密,在图谱建设方面还有很长的路要走;地貌发育演化的“空代时”方法将时间序列谱转化为空间系列谱,与地貌继承性理论相反,更多关注技术层面的可行性,在“空代时”之后如何继续研究其演化并无统一的理论框架,这也应成为之后研究的重点。

地貌信息图谱体系既应包含形态表象等特征,

也应包含成因、过程等信息,还应包含与地貌相关信息概括的规则等。目前的地貌信息图谱以形态特征谱为主,兼有地貌发育谱的谱系,多集中在形态层面,对地貌的成因、物质、过程和年龄的分析相对较少,这使得地貌信息图谱的应用停留在较为表面的层次,对机理性的揭示和挖掘缺乏相应的手段。许多图谱类型在应用上普适性不强,理论不够成熟,各谱系间关联性不高,图谱体系不够完善。因此,亟需在地貌类型分类系统的框架下,基于地貌的形态、成因、物质、过程和年龄五大要素所反映的内容,综合各类图谱特性,理清地貌要素所包含信息的逻辑关系,构建科学严密的地貌信息图谱体系。

7.2 亟需提升地貌信息图谱关键技术

计算机、大数据的发展给地貌信息图谱的发展带来了更多的机遇与挑战。一方面,多信息源为地貌信息图谱的分析提供了更有力的数据支撑,计算机技术为地貌信息图谱提供了可靠的软硬件条件和计算处理方法。另一方面,如何在纷杂的海量资源中提取可用数据,如何合理利用计算机技术并转化融合为地貌研究所用也成为地貌学研究需要重点攻关的难题。其中,需要重点关注地貌信息提取、地貌信息分类和地貌制图这3项地貌信息图谱构建的关键技术与计算机技术的融合发展。

地貌信息提取方面,目前还是以专家知识辅助人工智能的半自动化为主,在计算机自动提取规则上存在一定的不成熟性,之后需进一步与人工智能技术前沿接轨,并积极探求在地貌学方面的迁移转化;地貌信息分类方面,地貌学的很多要素知识如内营力、物质组成等没有直接的数据获取途径,这就导致了数据的二次处理对专家知识的依赖性很大且相关分析多停留在形态方面,未来需要继续发展形态与成因相结合的地貌分类自动化方法;地貌制图技术是在地貌信息提取和地貌信息分类之后实现结果呈现的技术,针对现在多尺度的数字地图,需加强制图综合技术的提升,以满足多尺度可缩放数字地图的需求。

当前人工智能技术已在土地利用分类和典型地貌类型识别等诸多方面取得突破,已经能通过知识规则与深度学习实现研究对象的自动分类,但是地貌类型的提取、分类研究还处于以专家知识综合判别为主、机器学习为辅的阶段,因此,亟需在完备的地貌信息图谱体系、地貌信息的计算方法以及地

貌发生学理论建立的地貌信息多组合模式的基础上,积极融合地貌知识图谱研究成果,研究基于人工智能等技术支持下的地貌信息提取、分类与制图方法,从而实现地貌单元的计量、边界、属性等特征的计算机自动计算与分类。

此外,也应关注地貌知识图谱与地貌信息图谱的融合、模型开发和虚拟现实等技术发展,全面提升地貌信息图谱解决复杂地表问题的能力。

7.3 亟需加强全球地貌格局与演变的精细化与量化研究

在全球化、信息化的时代背景下,包括地貌学等在内的地球系统科学研究步入了新的发展时期。当前在全球地貌类型划分与制图方面,国内外科学家已在全球地貌形态自动分类、洲际地貌小比例尺制图、重点区域详细地貌调查等方面取得了一些进展。但全球性地貌资源的调查、分类与制图编研还处于起步阶段,全球大比例尺的地貌图处于空白状态。随着全球化的推进和我国在全球资源分布、工程建设等方面研究的不断深化,亟需在全球海量数据资源的基础上,更精细化、量化地研究全球地貌空间分布及变化规律,从而为揭示地球演化历史、预判变化趋势等提供科学依据。

8 结 语

全文的组织框架如图1所示,从地学信息图谱的起源、内涵、相关研究、发展方向和类别体系的角度,对地学信息图谱进行了简要介绍。在此基础上论述了地貌信息图谱的起源及概念,并重点回顾了地貌形态特征谱和地貌发育谱这两种类型图谱的研究进展,总结了信息提取、信息分类和地貌制图这3个关键技术的研究现状,最后根据地貌信息图谱的发展历程,对未来工作做了展望。主要结论如下:

(1)地貌信息图谱作为地学信息图谱的子对象分支,其起源和概念与地学信息图谱有着千丝万缕的关系。地貌信息图谱继承并发扬了地学信息图谱的图形思维,实现了地貌学知识的科学凝练和系统性总结,是地学信息图谱在地貌研究领域的一次成功探索。

(2)在大数据时代背景下,地貌知识图谱的数据组织模式和推理检索功能为地貌信息图谱提供了可行的发展方向,地貌信息图谱也可作为地貌知识图谱重要的知识来源,二者未来的融合发展对地貌学研究有重要意义。

(3)根据分析角度不同,地貌信息图谱大致可

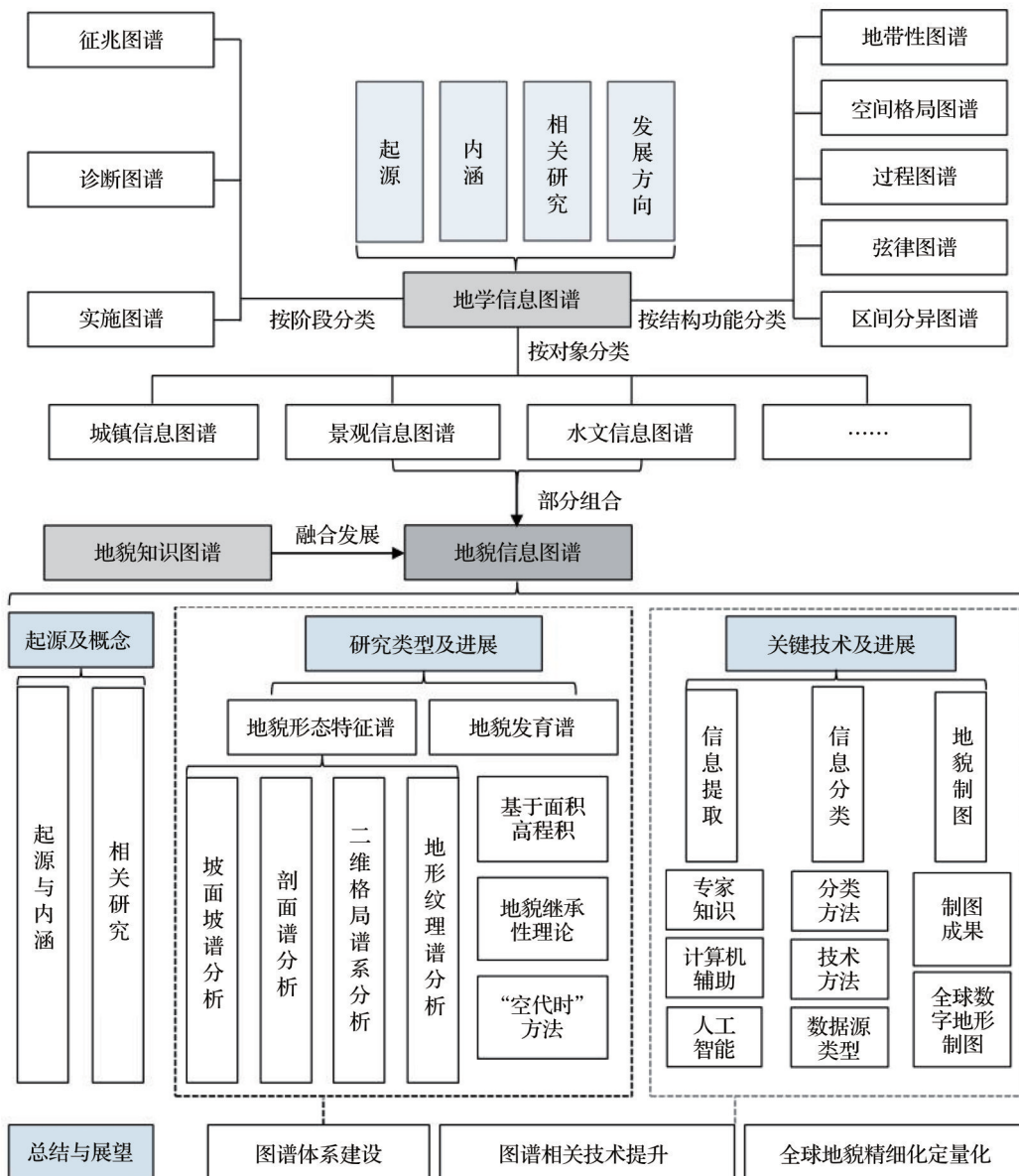


图 1 地学信息图谱与地貌信息图谱研究框架及进展

Fig. 1 Study frame and progress on geo-informatic Tupu and geomorphic information spectrum

分为地貌形态特征谱和地貌发育谱两类。地貌形态特征谱包括地面坡谱、剖面谱、二维格局谱和地形纹理谱,主要从地表形态角度对地貌进行分类描述。地貌发育谱采用面积—高程积分、地貌继承性研究和地貌“空代时”的方法,综合考虑地貌的成因机理特征。两类地貌信息谱相辅相成,近年来在理论与应用研究上都取得了较多成果。

(4)地貌信息图谱研究有三大关键技术,分别是地貌信息提取、地貌信息分类和地貌制图。地貌信息提取方面,目前还是以专家知识辅助的计算机半自动提取为主,未来应加强自动化提取的方法研

究;现阶段计算机能做到的地貌信息分类主要集中在地貌形态上,形态与成因相结合的自动分类方法是未来地貌分类的研究重点;地貌制图方面,全球大中比例尺制图成为未来地貌制图的方向。

(5)未来地貌信息图谱的发展亟需构建完备的地貌信息图谱体系,提升地貌信息图谱关键技术,加强全球地貌格局与演变的精细化与量化研究。

参考文献 (References) :

[1] CHEN Shupeng, YUE Tianxiang, LI Huiquo. Studies on geo-informatic Tupu and its application [J]. *Geographical Research*, 2000, 19(4): 337-343.[陈述彭, 岳天祥, 励惠国. 地

- 学信息图谱研究及其应用[J]. 地理研究, 2000, 19(4): 337-343.]
- [2] ZHANG Hongyan, ZHOU Chenghu, LÜ Guonian, *et al.* The connotation and inheritance of geo-information Tupu [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 653-661. [张洪岩, 周成虎, 闰国年, 等. 试论地学信息图谱思想的内涵与传承[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 653-661.]
- [3] CHEN Shupeng. Graphic methodology for geo-information sciences [M]. Beijing: The Commercial Press, 2001. [陈述彭. 地学信息图谱探索研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2001.]
- [4] CHEN Yan, QI Qingwen, YANG Guishan. Basic theories of geo-info-Tupu [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 306-310. [陈燕, 齐清文, 杨桂山. 地学信息图谱的基础理论探讨[J]. 地理科学, 2006, 26(3): 306-310.]
- [5] LIAO Ke. The discussion and prospect for geo-informatic Tupu [J]. *Geo-Information Science*, 2002, 4(1): 14-20. [廖克. 地学信息图谱的探讨与展望[J]. 地球信息科学, 2002, 4(1): 14-20.]
- [6] CHEN Shupeng. Shi Jianwen Cun—selection of academician Chen Shupeng's scientific essays [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1999: 386-387. [陈述彭. 石坚文存——陈述彭院士科学小品选集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1999: 386-387.]
- [7] CHEN Shupeng. Geo-info-Tupu case and diagnostic Tupu method [M]// CHEN Shupeng. Explorations in Earth science (Vol. 6): geo-information science. Beijing: Science Press, 2003: 204-208. [陈述彭. 地学信息图谱案例与诊断图谱方法[M]//陈述彭. 地学的探索(第六卷): 地球信息科学. 北京: 科学出版社, 2003: 204-208.]
- [8] LIAO Ke, QIN Jianxin, ZHANG Qingnian. On geo-informatic Tupu and digital Earth [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 55-61. [廖克, 秦建新, 张青年. 地学信息图谱与数字地球[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 55-61.]
- [9] QI Qingwen. The latest development on geo-info-Tupu [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(6): 15-23. [齐清文. 地学信息图谱的最新进展[J]. 测绘科学, 2004, 29(6): 15-23.]
- [10] ZHOU Chenghu, LI Baolin. A preliminary study on geo-info-Tupu [J]. *Geographical Research*, 1998, 17(Suppl.): 10-16. [周成虎, 李宝林. 地球空间信息图谱初步探讨[J]. 地理研究, 1998, 17(增刊): 10-16.]
- [11] CHEN Yufen, LIAO Ke. Research on complex informatic Tupu of natural landscape in China [J]. *Geo-Information Science*, 2003, 5(3): 97-102. [陈毓芬, 廖克. 中国自然景观综合信息图谱研究[J]. 地球信息科学, 2003, 5(3): 97-102.]
- [12] TIAN Yongzhong, YUE Tianxiang. Discussions on geo-info Tupu and its development and application [J]. *Geo-Information Science*, 2003, 5(3): 103-106. [田永中, 岳天祥. 地学信息图谱的研究及其模型应用探讨[J]. 地球信息科学, 2003, 5(3): 103-106.]
- [13] CHEN Shupeng. Some forward thinking about map science [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2001, 26(1): 1-6. [陈述彭. 地图科学的几点前瞻性思考[J]. 测绘科学, 2001, 26(1): 1-6.]
- [14] ZHANG Hongyan, WANG Qinmin, LU Xuejun, *et al.* Perspectives on geo-informatic graphic methodology [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(6): 997-1001. [张洪岩, 王钦敏, 鲁学军, 等. 地学信息图谱方法前瞻[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 997-1001.]
- [15] CHEN Yan, QI Qingwen, YANG Guishan. Explanation and application on the spatial and temporal attribution of the geo-info-Tupu [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(1): 10-13. [陈燕, 齐清文, 杨桂山. 地学信息图谱时空维的诠释与应用[J]. 地球科学进展, 2006, 21(1): 10-13.]
- [16] YANG Cunjian. The idea of geo-information Tupu and its practices [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 697-704. [杨存建. 地学信息图谱思想与实践探索[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 697-704.]
- [17] ZHOU Jiangping, CUI Gonghao, ZHANG Jingxiang, *et al.* A preliminary discussion on the study of transportation network's geo-informative Tupu of urban system [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(4): 397-406. [周江平, 崔功豪, 张京祥, 等. 城镇交通网络信息图谱研究刍议[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 397-406.]
- [18] YE Qinghua, LIU Gaohuan, TIAN Guoliang, *et al.* Analysis of spatial-temporal complex changes of land use in the Yellow River Delta [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(5): 461-474. [叶庆华, 刘高焕, 田国良, 等. 黄河三角洲土地利用时空复合变化图谱分析[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2004, 34(5): 461-474.]
- [19] ZHANG Baiping, ZHOU Chenghu, CHEN Shupeng. The geo-info-spectrum of montane altitudinal belts in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 163-171. [张百平, 周成虎, 陈述彭. 中国山地垂直带信息图谱的探讨[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 163-171.]
- [20] HU Zui, LIU Peilin, CHEN Ying. A research on graphic methodology unit model of traditional settlement landscape [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25(5): 79-83. [胡最, 刘沛林, 陈影. 传统聚落景观基因信息图谱单元研究[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(5): 79-83.]
- [21] LUO Jiancheng, WU Tianjun, XIA Liegang. The theory and calculation of spatial-spectral cognition of remote sensing [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(5): 578-589. [骆剑承, 吴田军, 夏列钢. 遥感图谱认知理论与计算[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 578-589.]
- [22] DU Guoming, ZHANG Rui, YU Fengrong. Analysis of cropping pattern in black soil region of northeast China based on geo-information Tupu [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 694-702. [杜国明, 张瑞, 于凤荣. 基于地学信息图谱的东北黑土区种植模式分析应用[J]. 生态学报, 2022, 33(3): 694-702.]
- [23] HAN Lei, HUO Hong, LIU Zhao, *et al.* Spatial and temporal variations of vegetation coverage in the middle section of Yellow River Basin based on terrain gradient: taking Yan'an City as an example [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1581-1592. [韩磊, 火红, 刘钊, 等. 基于地形梯度的黄河流域中段植被覆盖时空分异特征: 以延安市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1581-1592.]
- [24] SHI Yangyang, LÜ Xiao, HUANG Xianjin, *et al.* Arable land use transitions and its response of ecosystem services value change in Jiangsu coastal areas [J]. *Journal of Natural Resources*

- es, 2017, 32(6): 961-976.[史洋洋, 吕晓, 黄贤金, 等. 江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 961-976.]
- [25] TANG Changchun, LI Yaping. Geo-information Tupu process of land use/cover change in polycentric urban agglomeration: a case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(11): 2 626-2 641.[唐常春, 李亚平. 多中心城市群土地利用/覆被变化地学信息图谱研究: 以长株潭城市群为例[J]. 地理研究, 2020, 39(11): 2 626-2 641.]
- [26] ZHANG Wenhui, LÜ Xiao, SHI Yangyang, *et al.* Graphic characteristics of land use transition in the Yellow River Basin [J]. *China Land Science*, 2020, 34(8): 80-88.[张文慧, 吕晓, 史洋洋, 等. 黄河流域土地利用转型图谱特征[J]. 中国土地科学, 2020, 34(8): 80-88.]
- [27] ZHU Lei, YANG Aimin, XIA Xinxin, *et al.* Spatial distribution pattern and change characteristics analysis of cultivated land in the Manas River Basin from 1975 to 2015 [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(6): 887-899.[朱磊, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于空间自相关的1975—2015年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(6): 887-899.]
- [28] CHEN Zhu, HUANG Yabing, ZHU Zhipeng, *et al.* Landscape pattern evolution along terrain gradient in Fuzhou City, Fujian Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4 135-4 144.[陈铸, 黄雅冰, 朱志鹏, 等. 基于地形梯度特征的福州市景观格局演变[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4 135-4 144.]
- [29] LI Huiguo, YUE Tianxiang. An application of geo-informatic graphic analysis (Tupu) in modelling regional sustainable development [J]. *Geo-Information Science*, 2000, 2(1): 48-52.[励惠国, 岳天祥. 地学信息图谱与区域可持续发展虚拟[J]. 地球信息科学, 2000, 2(1): 48-52.]
- [30] TANG Guoan, NA Jiaming, CHENG Weiming. Progress of digital terrain analysis on regional geomorphology in China [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 570-1 591.[汤国安, 那嘉明, 程维明. 我国区域地貌数字地形分析研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 570-1 591.]
- [31] KEITH J T. A short history of geomorphology [M]. London: Croom Helm, 1985.
- [32] ZHOU Chenghu. A dictionary of geomorphology [Z]. Beijing: China Water & Power Press, 2006.[周成虎. 地貌学辞典[Z]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.]
- [33] Nation-wide Technical Standardization Committee of Geographic Information. Terms of cartography: GB/T 16820-2009 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd.[全国地理信息标准化技术委员会. 地图学术语: GB/T 16820-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.]
- [34] HU Shixiong, WANG Ke. Development and tendency of modern geomorphology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(Suppl.2): 67-78.[胡世雄, 王珂. 现代地貌学的发展与思考[J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊2): 67-78.]
- [35] MO Zhongda. A review of foreign theoretical systems of geomorphic development [J]. *Tropical Geomorphology*, 1988, 9(1): 56-64.[莫仲达. 外国地貌发育理论系统述评[J]. 热带地貌, 1988, 9(1): 56-64.]
- [36] EMBLETON C. Geomorphology, present problems and future prospects [M]. Oxford: Oxford University Press, 1978.
- [37] HART M G. Geomorphology, pure and applied [M]. London: Allen & Unwin Ltd., 1986: 265-279.
- [38] LU Huayu. Progress in geomorphology and future study: a brief review [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 8-15.[鹿化煜. 试论地貌学的新进展和趋势[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 8-15.]
- [39] TANG Guoan, LI Fayuan, YANG Xin, *et al.* Exploration and practice of digital terrain analysis in Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2015.[汤国安, 李发源, 杨昕, 等. 黄土高原数字地形分析探索与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [40] THAGARD P. Conceptual revolution [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1992.
- [41] LI Siguang. Coiling structure and other complex problems of tectonic system in northwest China [J]. *Acta Geological Sinica*, 1954, 34(4): 339-410.[李四光. 旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题[J]. 地质学报, 1954, 34(4): 339-410.]
- [42] CHEN Shupeng. A discuss on geo-info-Tupu [J]. *Geographical Research*, 1998, 17(Suppl.): 5-9.[陈述彭. 地学信息图谱刍议[J]. 地理研究, 1998, 17(增刊): 5-9.]
- [43] JI Cuiling, QI Qingwen, ZHANG Keli. Indexes system of 3D symbols on the landscapes Tupu of loess plateau and its application [J]. *Geo-Information Science*, 2005, 7(1): 47-52.[纪翠玲, 齐清文, 张科利. 黄土高原地貌形态图谱三维符号指标体系与应用[J]. 地球信息科学, 2005, 7(1): 47-52.]
- [44] CHEN Yan, QI Qingwen, TANG Guoan. Research on slope-conversion-atlas in Loess Plateau [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(3): 180-185.[陈燕, 齐清文, 汤国安. 黄土高原坡度转换图谱研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 180-185.]
- [45] CAO Jianjun, TANG Guoan, FANG Xuan, *et al.* Terrain relief periods of loess landforms based on terrain profiles of the Loess Plateau in northern Shaanxi Province, China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2019, 13(2): 410-421.
- [46] ZHANG Baiping, YAO Yonghui, MO Shenguo, *et al.* Digital spectra of altitudinal belts and their hierarchical system [J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(6): 660-665.[张百平, 姚永慧, 莫申国, 等. 数字山地垂直带谱及其体系的探索[J]. 山地学报, 2002, 20(6): 660-665.]
- [47] YAO Yonghui, ZHANG Baiping, HAN Fang, *et al.* Diversity and geographical pattern of altitudinal belts in the Hengduan Mountains in China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 7(2): 123-132.
- [48] HOGAN A. The semantic web: two decades on [J]. *Semantic Web*, 2020, 11(1): 169-185.
- [49] SOWA J F. Principles of semantic networks: exploration in the representation of knowledge [M]. San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1991: 135-157.
- [50] MICHIE D. Expert systems [J]. *The Computer Journal*, 1980, 23(4). DOI: 10.1093/comjnl/23.4.369.
- [51] POLI R, HEALY M, KAMEAS A. Theory and applications of ontology: computer applications [M]. Dordrecht: Springer,

- 2010.
- [52] BERNERS-LEE T, HENDLER J, LASSILA O. The semantic web[J]. *Scientific American*, 2001, 284(5): 34-43.
- [53] TIM B L, HENDLER J. Publishing on the semantic web[J]. *Nature*, 2001, 410(6 832): 1 023-1 024.
- [54] CHRISTIAN B, TOM H, TIM B L. Linked data-the story so far[J]. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 2009, 5(3). DOI: 10.4018/jswis.2009081901.
- [55] EDER J S. Knowledge graph based search system: U S, US20120158633A1[P/OL]. (2012-06-21)[2021-09-30]. <https://www.freepatentonline.com/y2012/0158633.html>.
- [56] ZHU Yunqiang, SUN Kai, HU Xiumian, et al. Research and practice on the framework for the construction, sharing, and application of large-scale geoscience knowledge graphs [J/OL]. *The Earth Information Science Journals*. [2022-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5809.p.20220304.0843.002.html>. [诸云强, 孙凯, 胡修棉, 等. 大规模地球科学知识图谱构建与共享应用框架研究与实践[J/OL]. 地球信息科学学报. [2022-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5809.p.20220304.0843.002.html>.]
- [57] WANG Zhihua, YANG Xiaomei, ZHOU Chenghu. Geographic knowledge graph for remote sensing big data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(1): 16-28.[王志华, 杨晓梅, 周成虎. 面向遥感大数据的地理知识图谱构想[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(1): 16-28.]
- [58] XU Jun, PEI Tao, YAO Yonghui. Conceptual framework and representation of geographic knowledge map [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2010, 12(4): 496-502, 509.[许珺, 裴韬, 姚永慧. 地理知识图谱的定义、内涵和表达方式的探讨[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4): 496-502, 509.]
- [59] LU Feng, YU Li, QIU Peiyuan. On geographic knowledge graph[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2017, 19(6): 723-734.[陆锋, 余丽, 仇培元. 论地理知识图谱[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(6): 723-734.]
- [60] LAXTON J L. Geological map fusion: OneGeology-Europe and INSPIRE[M]// RIDDICK A T, KESSLER H, GILES J R A. Integrated environmental modelling to solve real world problems: methods, vision and challenges. Geological Society of London, 2017.
- [61] ZHOU L, CHEATHAM M, KRISNADHI A, et al. GeoLink data set: a complex alignment benchmark from real-world ontology[J]. *Data Intelligence*, 2020, 2(3): 353-378.
- [62] WANG C S, HAZEN R M, CHENG Q M, et al. The Deep-Time Digital Earth program: data-driven discovery in geosciences[J]. *National Science Review*, 2021, 8(9): nwab027.
- [63] WANG J M, HU Y J, JOSEPH K. NeuroTPR: a neuro-net toponym recognition model for extracting locations from social media messages[J]. *Transactions in GIS*, 2020, 24(3): 719-735.
- [64] YU Li, LU Feng, LIU Xiliang. A bootstrapping based approach for open geo-entity relation extraction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 616-622.[余丽, 陆锋, 刘希亮. 开放式地理实体关系抽取的 Bootstrapping 方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 616-622.]
- [65] TRISEDDYA B D, QI J Z, ZHANG R. Entity alignment between knowledge graphs using attribute embeddings[J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2019, 33: 297-304.
- [66] YU L, QIU P Y, LIU X L, et al. A holistic approach to aligning geospatial data with multidimensional similarity measuring [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(8): 845-862.
- [67] MAI G C, JANOWICZ K, CAI L, et al. SE-KGE: a location-aware knowledge graph embedding model for geographic question answering and spatial semantic lifting[J]. *Transactions in GIS*, 2020, 24(3): 623-655.
- [68] BALLATORE A, WILSON D C, BERTOLOTTI M. A survey of volunteered open geo-knowledge bases in the semantic web [M]// PASI G, BORDOGNA G, JAIN L C. Quality issues in the management of web information. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 93-120.
- [69] MA Zhonggui, NI Runyu, YU Kaihang. Recent advances, key techniques and future challenges of knowledge graph [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(10): 1 254-1 266.[马忠贵, 倪润宇, 余开航. 知识图谱的最新进展、关键技术和挑战[J]. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1 254-1 266.]
- [70] JIANG Bingchuan, WAN Gang, XU Jian, et al. Geographic knowledge graph building extracted from multi-sourced heterogeneous data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(8): 1 051-1 061.[蒋秉川, 万刚, 许剑, 等. 多源异构数据的大规模地理知识图谱构建[J]. 测绘学报, 2018, 47(8): 1 051-1 061.]
- [71] LI Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 1-11.[李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 1-11.]
- [72] LU Huayu, AN Zhisheng, WANG Xiaoyong, et al. Geomorphic evidence of staged uplift in the northeastern margin of the Tibetan plateau during the last 14Ma [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 34(9): 855-857, 856.[鹿化煜, 安芷生, 王晓勇, 等. 最近 14Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(9): 855-857, 856.]
- [73] XIN Z H, HAN J T, GAO R, et al. Electrical structure of the eastern segment of the Qilian orogenic belt revealed by 3-D inversion of magnetotelluric data: new insights into the evolution of the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 210: 104707.
- [74] XUE Xianwu, CHEN Xi, ZHANG Zhicai, et al. Categorization of karst landform on the basis of landform factor eigenvalue [J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(2): 175-180.[薛显武, 陈喜, 张志才, 等. 基于地形因子特征值的喀斯特流域地貌类型判别[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 175-180.]
- [75] JIANG S, HUANG M, DENG A, et al. Theoretical solution for long-term settlement of a large step-tapered hollow pile in karst topography [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(8). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002062.
- [76] QIAN Xuesen. On the development of geo-science [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(3): 257-261.[钱学森. 关于地

- 学的发展问题[J].地理学报, 1989, 44(3):257-261.]
- [77] WANG J, CHENG W M, ZHOU C H, *et al.* Automatic mapping of lunar landforms using DEM-derived geomorphometric parameters [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(11): 1 413-1 427.
- [78] LIU Qiangyi, CHENG Weiming, YAN Guangjian, *et al.* Distribution characteristics and classification schemes of lunar surface elevation [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 106-119.[刘橇漪, 程维明, 阎广建, 等. 月表高程分布特征及其分级标准初探[J]. 地理学报, 2022, 77(1): 106-119.]
- [79] PRIMA O D A, YOSHIDA T. Characterization of volcanic geomorphology and geology by slope and topographic openness [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(1/2): 22-32.
- [80] ZHAO Mudan, TANG Guoan, CHEN Zhengjiang, *et al.* Slope classification systems and their slope spectrum in hill and gully area of the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(4): 33-36.[赵牡丹, 汤国安, 陈正江, 等. 黄土丘陵沟壑区不同坡度分级系统及地面坡谱对比[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 33-36.]
- [81] LI F Y, TANG G A, WANG C, *et al.* Slope spectrum variation in a simulated loess watershed [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(2): 328-339.
- [82] YUE Tianxiang, AI Nanshan, ZHANG Yingbao. Superentropy-a criterion for determining stability of drainage system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 3(2): 20-28.[岳天祥, 艾南山, 张英保. 论流域系统稳定性的判别指标: 超熵 [J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 20-28.]
- [83] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [84] LI Fayuan, TANG Guoan, JIA Yini, *et al.* Scale effect and spatial distribution of slope spectrum's information entropy [J]. *Geo-Information Science*, 2007, 9(4): 13-18.[李发源, 汤国安, 贾旖旎, 等. 坡谱信息熵尺度效应及空间分异 [J]. 地球信息科学, 2007, 9(4): 13-18.]
- [85] LIU Shuanglin, LI Fayuan, JIANG Ruqiao, *et al.* A method of loess landform automatic recognition based on slope spectrum [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(10): 1 234-1 242.[刘双琳, 李发源, 蒋如乔, 等. 黄土地貌类型的坡谱自动识别分析 [J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(10): 1 234-1 242.]
- [86] WANG Chun. The uncertainty of slope spectrum derived from DEM in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province [D]. Xi'an: Northwest University, 2005.[王春. 基于DEM的陕北黄土高原地面坡谱不确定性研究 [D]. 西安: 西北大学, 2005.]
- [87] WU Rui, WANG Lanhui, TANG Guoan. Terrain profile spectrum of China land border [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2012, 28(5): 51-54.[吴瑞, 王兰辉, 汤国安. 中国陆地边界地形剖面谱研究初探 [J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(5): 51-54.]
- [88] LIU Mingguang. Atlas of physical geography of China [M]. Beijing: SinoMaps Press, 2010.[刘明光. 中国自然地理图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 2010.]
- [89] FONT M, AMORESE D, LAGARDE J L. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: the Normandy intraplate area (NW France) [J]. *Geomorphology*, 2010, 119(3/4): 172-180.
- [90] LU Zhongchen, ZHOU Jinxing, CHEN Hao. River bed longitudinal profile morphology of the lower Yellow River and its implication in physiography [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 30-38.[陆中臣, 周金星, 陈浩. 黄河下游河床纵剖面形态及其地文学意义 [J]. 地理研究, 2003, 22(1): 30-38.]
- [91] RANTITSCH G, PISCHINGER G, KURZ W. Stream profile analysis of the Koralm Range (eastern Alps) [J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 2009, 102(1): 31-41.
- [92] WITTKOP C, PERIGNON M. Decadal-scale evolution of the 2006 suncook river avulsion, new Hampshire, USA [J]. *Geomorphology*, 2021, 376: 107572.
- [93] TALUKDAR R, KOTHYARI G C, PANT C C. Evaluation of neotectonic variability along major Himalayan thrusts within the Kali River Basin using geomorphic markers, Central Kumaun Himalaya, India [J]. *Geological Journal*, 2020, 55(1): 821-844.
- [94] FIELDING E J, ISACKS B, BARAZANGI M, *et al.* How flat is Tibet [J]. *Geology*, 1994, 22:163-167.
- [95] XIAO F, LING F, DU Y, *et al.* Digital extraction of altitudinal belt spectra in the West Kunlun Mountains using SPOT-VGT NDVI and SRTM DEM [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 7(2): 133-145.
- [96] PARTELI E J R, SCHWÄMMLE V, HERRMANN H J, *et al.* Profile measurement and simulation of a transverse dune field in the Lençóis Maranhenses [J]. *Geomorphology*, 2006, 81(1/2): 29-42.
- [97] DURAI P, SARUNJITH K J, BHASKAR A S. Demarcation of coastal dune morphology and dune patterns using geospatial models: a case study from manapad coastal stretch, Tamil Nadu, south India [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2021, 97(11): 1 408-1 414.
- [98] TANG Guoan, LI Fayuan, XIONG Liyang. Progress of digital terrain analysis in the Loess Plateau of China [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2017, 33(4): 1-7.[汤国安, 李发源, 熊礼阳. 黄土高原数字地形分析研究进展 [J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4): 1-7.]
- [99] CAMILA K B, TANG Guoan, YANG Xin, *et al.* Fractal dimension features from Catchment Boundary Profile (CBP) of small watersheds in the northern Shaanxi Province of China [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 42(4): 131-144.[卡米拉, 汤国安, 杨昕, 等. 基于流域边界剖面线的陕北小流域分形特征 [J]. 南京师大学报(自然科学版), 2019, 42(4): 131-144.]
- [100] KAN Aike, ZHU Lidong, GONG Jianhui, *et al.* Development of the swath profile tool based on ArcView GIS and its application in morphometric analysis [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(1): 64-69.[阚爱珂, 朱利东, 龚建辉, 等. 基于ArcView的带状剖面工具开发及在地貌分析中的应用 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 64-69.]
- [101] ZOU Binwen, MA Weifeng, LONG Yu, *et al.* Extraction method of swath profile based on ArcGIS and its application in landform analysis [J]. *Geography and Geo-Information Science*,

- 2011, 27(3): 42-44.[邹斌文, 马维峰, 龙昱, 等. 基于 ArcGIS 的条带剖面提取方法在地貌分析中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(3): 42-44.]
- [102] LÜ Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Study on catchments structure info-Tupu [J]. *Geographical Research*, 1998, 19(Suppl.): 23-32.[闰国年, 钱亚东, 陈钟明. 流域结构信息图谱研究[J]. 地理研究, 1998, 19(增刊): 23-32.]
- [103] YANG Kai, YUAN Wen, ZHAO Jun, *et al.* Stream structure characteristics and its urbanization responses to Tidal River system[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 557-564.[杨凯, 袁雯, 赵军, 等. 感潮河网地区水系结构特征及城市化响应[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 557-564.]
- [104] QIN Yaochen, LIU Kai. Advancement of applied studies of fractal theory in geography[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 426-436.[秦耀辰, 刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4): 426-436.]
- [105] TURCOTTE D L, BROWN S R. Fractals and chaos in geology and geophysics[J]. *Physics Today*, 1993, 46(5): 68.
- [106] CHEN Yanguang, LIU Jisheng. Fractals and fractal dimensions of structure of river systems: models reconstruction and parameters interpretation of Horton's laws of network composition [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(2): 178-183.[陈彦光, 刘继生. 水系结构的分形和分维: Horton 水系定律的模型重建及其参数分析[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 178-183.]
- [107] la BARBERA P, ROSSO R. On the fractal dimension of stream networks [J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(4): 735-741.
- [108] JIANG Yongqing, SHAO Mingan, LI Zhanbin, *et al.* Horton's order ratios of water course network of drainage basin and their fractal characters in the Loess Plateau[J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(2): 206-211.[姜永清, 邵明安, 李占斌, 等. 黄土高原流域水系的 HORTON 级比数和分形特性[J]. 山地学报, 2002, 20(2): 206-211.]
- [109] LONG Tengwen, ZHAO Jingbo. A study on the fractal properties of a typical drainage basin on the Loess Plateau based on DEM[J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(4): 304-308.[龙腾文, 赵景波. 基于 DEM 的黄土高原典型流域水系分形特征研究[J]. 地球与环境, 2008, 36(4): 304-308.]
- [110] ZHANG Yanru, LI Guoqing, LIU Guan, *et al.* Fractal characteristics of water system and geomorphic erosion development of Yangou basin in Yan'an City of Shaanxi Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(2): 7-10.[张艳如, 李国庆, 刘冠, 等. 陕西省延安市燕沟流域水系分形与地貌侵蚀发育研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 7-10.]
- [111] STANKIEWICZ J. Fractal river networks of Southern Africa [J]. *South African Journal of Geology*, 2005, 108(3): 333-344.
- [112] WANG S W, JI H, LI P, *et al.* Growth diffusion-limited aggregation for basin fractal river network evolution model[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(7): 075317.
- [113] LIU Kai, TANG Guoan, TAO Yang, *et al.* GLCM based quantitative analysis of terrain texture from DEMs [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(6): 751-760.[刘凯, 汤国安, 陶喈, 等. 基于灰度共生矩阵的 DEM 地形纹理特征量化研究[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(6): 751-760.]
- [114] ZHU Changqing, YANG Qihe, ZHU Wenzhong. Remote sensing relief image texture analysis and classification based on wavelet transform features [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1996, 25(4): 252-256.[朱长青, 杨启和, 朱文忠. 基于小波变换特征的遥感地貌影像纹理分析和分类[J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 252-256.]
- [115] JIANG Sheng, TANG Guoan, YANG Xin, *et al.* Conceptual model of terrain texture in Loess Plateau based on DEM [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(6): 959-968.[蒋圣, 汤国安, 杨昕, 等. 基于 DEM 的黄土高原地形纹理概念模型[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 959-968.]
- [116] LIU Kai, TANG Guoan, HUANG Xiaoli, *et al.* Research on the difference between textures derived from DEM and remote-sensing image for topographic analysis [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2016, 18(3): 386-395.[刘凯, 汤国安, 黄晓力, 等. 面向地形特征的 DEM 与影像纹理差异分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(3): 386-395.]
- [117] DING H, NA J M, HUANG X L, *et al.* Stability analysis unit and spatial distribution pattern of the terrain texture in the northern Shaanxi Loess Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(3): 577-589.
- [118] XU Y X, ZHANG S J, LI J Y, *et al.* Extracting terrain texture features for landform classification using wavelet decomposition [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(10): 658.
- [119] QIU Z H, YUE L W, LIU X G. Void filling of digital elevation models with a terrain texture learning model based on generative adversarial networks [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2829.
- [120] JAFARPOUR G K, SHAMSODDINI A, MOUSAVI M N, *et al.* Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019-2049) Zarrin-Rüd River Basin in Iran [J]. *Environmental Challenges*, 2022, 6: 100399.
- [121] LIU Y K, BAAS A C W. Internal sedimentary structure of linear dunes modelled with a cellular automaton [J]. *Sedimentology*, 2020, 67(7): 3 718-3 734.
- [122] GÁLVEZ G, MUÑOZ A. Three-dimensional cellular automata as a model of a seismic fault [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 792: 012087.
- [123] PIROLA M, BUSTOS S, MORALES M R, *et al.* The mid to late Holocene transition in Barrancas, Jujuy, Argentina: regional climate change, local environments and archaeological implications [J]. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2018, 18: 722-738.
- [124] ARPONEN V, GRIMM S, KÄPPEL L, *et al.* Between natural and human sciences: on the role and character of theory in socio-environmental archeology [J]. *The Holocene*, 2019, 29(10): 1 671-1 676.
- [125] STRAHLER A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1952, 63(11): 1117.
- [126] LI Qiang, LU Zhongchen, YUAN Baoyin. Quantitative study of the stage of geomorphological evolution [J]. *Acta Geographi-*

- ca Sinica, 1990, 45(1): 110-120.[励强, 陆中臣, 袁宝印. 地貌发育阶段的定量研究[J]. 地理学报, 1990, 45(1): 110-120.]
- [127] AI Nanshan. Coentropy in erosional-drainage-system [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(2): 1-8.[艾南山. 侵蚀流域系统的信息熵[J]. 水土保持学报, 1987, 1(2): 1-8.]
- [128] XIN Zhongbao, XU Jiongxin, MA Yuanxu. Hypsometric integral analysis and its sediment yield implications in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3): 356-363.[信忠保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积-高程分析及其侵蚀地貌学意义[J]. 山地学报, 2008, 26(3): 356-363.]
- [129] WALCOTT R C, SUMMERFIELD M A. Scale dependence of hypsometric integrals: an analysis of southeast African Basins [J]. *Geomorphology*, 2008, 96(1/2): 174-186.
- [130] KORUP O, MONTGOMERY D R. Tibetan Plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge [J]. *Nature*, 2008, 455(7214): 786-789.
- [131] ZHU Shijie, TANG Guoan, LI Fayuan, et al. Spatial variation of hypsometric integral in the Loess Plateau based on DEM [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 921-932.[祝士杰, 汤国安, 李发源, 等. 基于DEM的黄土高原面积高程积分研究地理学报, 2013, 68(7): 921-932.]
- [132] LIU Dongsheng. Loess accumulation in China [M]. Beijing: Science Press, 1965.[刘东生. 中国的黄土堆积[M]. 北京: 科学出版社, 1965.]
- [133] WILLIAMS P W. LIU Hong, SONG Linhua, translated. Geomorphic inheritance and the development of tower karst [J]. *Progress in Geography*, 1990, 9(1): 11-16.[威廉姆斯. 刘宏, 宋林华, 译. 地貌继承性和塔状喀斯特的发育[J]. 地理译报, 1990, 9(1): 11-16.]
- [134] XIONG L Y, TANG G A, YUAN B Y, et al. Geomorphological inheritance for loess landform evolution in a severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on digital elevation models [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1944-1952.
- [135] HALL A M, EBERT K, HÄTTESTRAND C. Pre-glacial landform inheritance in a glaciated shield landscape [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2013, 95(1): 33-49.
- [136] STOLAR D B, WILLET S D, MONTGOMERY D R. Characterization of topographic steady state in Taiwan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 261(3/4): 421-431.
- [137] CERVANTES P, WILTSCHKO D V. Tip to midpoint observations on syntectonic veins, Ouachita orogen, Arkansas: trading space for time [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(8): 1085-1100.
- [138] ZHANG Ouyang, JIN Desheng, CHEN Hao. An experimental study on spatial and temporal processes and complex response of river channel evolution [J]. *Geographical Research*, 2000, 19(2): 180-188.[张欧阳, 金德生, 陈浩. 游荡河型造床实验过程中河型的时空演替和复杂响应现象[J]. 地理研究, 2000, 19(2): 180-188.]
- [139] HUANG Xiaoli, DING Hu, NA Jiaming, et al. Theories and methods of space-for-time substitution in geomorphology [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 94-104.[黄晓力, 丁浒, 那嘉明, 等. 地貌发育演化研究的空代时理论与方法[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 94-104.]
- [140] SU Shiyu, LI Juzhang. Geomorphic mapping [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999.[苏时雨, 李钜章. 地貌制图[M]. 北京: 测绘出版社, 1999.]
- [141] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. 1:1,000,000 geomorphological mapping specification [M]. Beijing: Science Press, 1987.[中国科学院地理研究所. 中国1:100万地貌图制图规范[M]. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [142] DEMEK J, EMBLETON C. Guide to medium-scale geomorphological mapping [M]. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), 1978.
- [143] DEMEK J. Manual of detailed geomorphological mapping [M]. Prague: Academia, 1972.
- [144] TANG Guoan. Progress of DEM and digital terrain analysis in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1305-1325.[汤国安. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1305-1325.]
- [145] WHIPPLE K X, KIRBY E, BROCKLEHURST S H. Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief [J]. *Nature*, 1999, 401(6748): 39-43.
- [146] FAVALLI M, FORNACIAI A. Visualization and comparison of DEM-derived parameters. application to volcanic areas [J]. *Geomorphology*, 2017, 290: 69-84.
- [147] PATIL P L, DASOG G S, YERIMANI S A, et al. Morphometric analysis of landforms on basalt, granite gneiss and schist geological formations in north Karnataka, India—a comparison [J]. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2020, 4(4): 288-297.
- [148] SIDDIQ R, HASAN F, AGUSTIAN Y, et al. Morphometry study and integrated management of dibawah lake watershed solok regency [J]. *Civil Engineering and Architecture*, 2019, 7(3A): 19-26.
- [149] CORREA-MUÑOZ N A, MURILLO-FEO C A, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ L J. The potential of PALSAR RTC elevation data for landform semi-automatic detection and landslide susceptibility modeling [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2019, 52(Suppl.1): 148-159.
- [150] LÜ Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Study of automated extraction of shoulder line of valley from grid digital elevation data [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(6): 567-573.[闰国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟沿线技术研究[J]. 地理科学, 1998, 18(6): 567-573.]
- [151] XIAO Fei, ZHANG Baiping, LING Feng, et al. DEM based auto-extraction of geomorphic units [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 459-466.[肖飞, 张百平, 凌峰, 等. 基于DEM的地貌实体单元自动提取方法[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 459-466.]
- [152] LONG En, CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, et al. Extraction of landform information in Changbai Mountains based on Srtm-DEM and TM data [J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(5): 557-565.[龙恩, 程维明, 周成虎, 等. 基于Srtm-DEM与遥感的长白山基本地貌类型提取方法[J]. 山地

- 学报, 2007, 25(5): 557-565.]
- [153] SREEKESH S, KAUR N, NAIK S R S. An OBIA and rule algorithm for coastline extraction from high- and medium-resolution multispectral remote sensing images[J]. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2020, 3(1/2): 24-34.
- [154] BAMDADINEJAD M, KETABDARI M J, CHAVOOSHI S M H. Shoreline extraction using image processing of satellite images [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, 49(10): 2365-2375.
- [155] RHOADS B L, THORN C E. The scientific nature of geomorphology[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [156] CHENG W M, ZHOU C H, LI B Y, et al. Structure and contents of layered classification system of digital geomorphology for China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(5): 771-790.
- [157] SHEN Yuchang, SU Shiyu, YIN Zesheng. Retrospect and prospect of the research work on the classification, regionalization and mapping of the geomorphology of China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1982, 2(2): 97-105.[沈玉昌, 苏时雨, 尹泽生. 中国地貌分类、区划与制图研究工作的回顾与展望[J]. 地理科学, 1982, 2(2): 97-105.]
- [158] ZHOU Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(6): 707-724.[周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 707-724.]
- [159] CHEN Zhiming. Explanations of geomorphological map of China and its adjacent areas (1:4,000,000): an outline of China's geomorphology[M]. Beijing: SinoMaps Press, 1993.[陈志明. 1:400 万中国及其毗邻地区地貌图说明书·中国地貌纲[M]. 北京: 中国地图出版社, 1993.]
- [160] LI Jijun. The geomorphological atlas of the People's Republic of China [M]. Beijing: Science Press, 2009.[李吉均. 中华人民共和国地貌图集(1:100 万)[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [161] KRESLAVSKY M A, HEAD J W, NEUMANN G A, et al. Lunar topographic roughness maps from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: scale dependence and correlation with geologic features and units[J]. *Icarus*, 2013, 226(1): 52-66.
- [162] PIPAUD I, LEHMKUHL F. Object-based delineation and classification of alluvial fans by application of mean-shift segmentation and support vector machines [J]. *Geomorphology*, 2017, 293: 178-200.
- [163] YANG X W, TANG G A, MENG X, et al. Classification of Karst Fenglin and Fengcong landform units based on spatial relations of terrain feature points from DEMs [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1950.
- [164] EVANS I S, DIKAU R, TOKUNAGA E, et al. Concepts and modelling in geomorphology: international perspectives [M]. Tokyo: TERRAPUB, 2003.
- [165] SUMMERFIELD M A. Global geomorphology [M]. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2013.
- [166] HAMMOND E H. Small-scale continental landform maps [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1954, 44(1): 33-42.
- [167] EVANS I S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics[M]// CHORLEY R J. Spatial analysis in geomorphology. London: Harper & Row, 1972.
- [168] LIU Q Y, CHENG W M, YAN G J, et al. A machine learning approach to crater classification from topographic data [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): 2594.
- [169] ARABAMERI A, CERDA A, PRADHAN B, et al. A methodological comparison of head-cut based gully erosion susceptibility models: combined use of statistical and artificial intelligence [J]. *Geomorphology*, 2020, 359: 107136.
- [170] ZHAO Y, MENG X M, QI T J, et al. AI-based identification of low-frequency debris flow catchments in the Bailong River Basin, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 359: 107125.
- [171] SZABÓ Z C, MIKITA T, NÉGYESI G, et al. Uncertainty and overfitting in fluvial landform classification using laser scanned data and machine learning: a comparison of pixel and object-based approaches[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3652.
- [172] LI X M, YAN P, LIU B L. Geomorphological classification of aeolian-fluvial interactions in the desert region of North China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2020, 172: 104021.
- [173] HAMMOND E H. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale land form mapping [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1964, 54(1): 11-19.
- [174] MACMILLAN R A, PETTAPIECE W W, NOLAN S C, et al. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 113(1): 81-109.
- [175] MITCHELL C W. Terrain evaluation, 2nd ed. Longman scientific and technical [M]. Harlow Essex, UK/New York: Halsted Press (Wiley), 1991.
- [176] LI S J, XIONG L Y, TANG G A, et al. Deep learning-based approach for landform classification from integrated data sources of digital elevation model and imagery [J]. *Geomorphology*, 2020, 354: 107045.
- [177] SMITH M J, PARON P, GRIFFITHS J S. Geomorphological mapping methods and application [M]. Boston: Elsevier, 2011.
- [178] VITEK J D, GIARDINO J R, FITZGERALD J W. Mapping geomorphology: a journey from paper maps, through computer mapping to GIS and virtual reality [J]. *Geomorphology*, 1996, 16(3): 233-249.
- [179] CHENG Weiming. Development and prospect of modern geomorphological cartography: commemorating the 100th anniversary of Mr. Chen Shupeng's birthday [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(4): 688-696.[程维明. 现代地貌制图学的发展与展望: 纪念陈述彭先生诞辰 100 周年 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 688-696.]
- [180] ZHOU Chenghu, CHENG Weiming, QIAN Jinkai. Digital geomorphological interpretation and mapping from remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2009.[周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌遥感解析与制图 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [181] LI Bingyuan, LI Juzhang. Geomorphologic map of China (1:4 million) [M]. Beijing: Science Press, 1994.[李炳元, 李钜章. 中国地貌图(1:400 万)[M]. 北京: 科学出版社, 1994.]

- [182] CHENG Weiming, ZHOU Chenghu, LI Bingyuan, *et al.* Geomorphological regionalization theory system and division methodology of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 839-856.[程维明, 周成虎, 李炳元, 等. 中国地貌区划理论与分区体系研究[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 839-856.]
- [183] COURTY L G, SORIANO-MONZALVO J C, PEDROZO-ACUÑA A. Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM, and ASTER) for flood modelling purposes [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2019, 12 (Suppl. 1): e12550.
- [184] DRĂGUȚ L, EISANK C. Automated object-based classification of topography from SRTM data[J]. *Geomorphology (Amsterdam, Netherlands)*, 2012, 141/142(4): 21-33.
- [185] HARRIS P T, MACMILLAN-LAWLER M, RUPP J, *et al.* Geomorphology of the oceans [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 4-24.
- [186] SHEN X Y, VERGARA H J, NIKOLOPOULOS E I, *et al.* GDBC: a tool for generating global-scale distributed basin morphometry [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 83: 212-223.

Commentaries and Prospect on the Geomorphic Information Spectrum*

CHENG Weiming^{1,2,3,4}, SONG Keyu^{1,2}, ZHOU Chenghu^{1,2,3,4},
TANG Guoan^{3,5}

- (1. *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Jiangsu Collaborative Innovation Center for Development and Utilization of Geographic Information Resources, Nanjing 210023, China*; 4. *Collaborative Innovation Center for South China Sea Research, Nanjing 210093, China*; 5. *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China*)

Abstract: Geo-information Tupu, which is the origin of the geomorphic information spectrum, is introduced and the concept and development of the geomorphic information spectrum are then discussed. From the perspective of specific research, the research types and status of the geomorphic information spectrum are summarized, including the geomorphic morphological characteristic spectrum (such as, surface slope spectrum, section spectrum, two-dimensional pattern spectrum, and topographic texture spectrum) and the geomorphic development spectrum. Combined with the development of remote sensing, computers, artificial intelligence, and other technologies, the prospect of the combination of knowledge graph and information spectrum in future geomorphic research is analyzed, and the research progress and key technologies of geomorphic information spectrum such as geomorphic information extraction, geomorphic information classification, and geomorphic mapping are summarized. The future development of geomorphic information spectrum is prospected using three aspects: constructing a complete geomorphic information spectrum system, improving key technologies of geomorphic information spectrum, and strengthening the refinement and quantitative research of global geomorphic patterns and evolution. This study can provide a reference for the digitization, informatization, and intellectualization of digital geomorphology to serve as the major strategy for the management of national resources and the environment and promote the development of geomorphology.

Key words: Geomorphic information spectrum; Digital terrain; Knowledge graph; Automatic classification; Geomorphic mapping.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China “Geomorphic classification and mapping based on geomorphic information spectrum” (Grant No. 42130110).

First author: CHENG Weiming (1973-), male, Tianshui City, Gansu Province, Professor. Research areas include digital geomorphology and planetary geomorphology. **E-mail:** chengwm@lreis.ac.cn