

引用格式: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. [Yang C J. The idea of Geo-information Tupu and its practices[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(4):697-704.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.200173

地学信息图谱思想与实践探索

杨存建

四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室,地理与资源科学学院,成都 610068

The Idea of Geo-information Tupu and its Practices

YANG Cunjian*

Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Faculty of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China

Abstract: The idea of geo-information Tupu is reviewed and summarized by reading and analyzing the theses published by Academician of Chinese Academy of Sciences, Prof. Chen Shupeng in this paper, which come from his scientific probe into geo-system. Geo-information Tupu is the result of combination of Geo-Tupu and information technology, which aims at discovering spatial and temporal knowledge and rule of geo-science, and can provide service to social and economic construction. Geo-information Tupu is classified into different types for each branch of geo-science and each industry according to its research object, and it is also classified into symptom Tupu, diagnosisTupu and realization Tupu according to its function. Prof. Chen developed the technology method for generating geo-information Tupu, proposed the workflow of geo-information Tupu, promoted the application of geo-information Tupu to the economic and social development. Prof. Chen indicated innovation directions of geo-information Tupu development which include innovation of technology and method of obtaining geo-science big data, improvement of intelligent and automatic level of generating geo-information Tupu, and enhancement of the wide and deep application of geo-information Tupu in social and economic construction. Prof. Chen pointed out grid map is important base of geo-information Tupu. The idea of geo-information Tupu proposed by Prof. Chen still has important guidance value in promoting the advance of geo-information science and meeting the major strategic needs of our country. The exploratory practice and results under the guidance of the idea of geo-information Tupu proposed by Prof. Chen were concluded here. The thematic information extraction technology based on knowledge discovery and the fine geo-surface element acquisition technology based on multi-data and multi-knowledge cooperation have been developed in recent years, which improves the automation level and efficiency of obtaining geo-science elements such as waterbody, settlements, green vegetation cover, snow cover, vegetation and landuse types in detail. The study and application of spatio-temporal change information Tupu have been broaden. The intelligent level and efficiency of generating the spatio-temporal change Tupu have been improved. The application of Geo-information Tupu in social and economic development, ecological construction, environmental protection and disaster risk prevention and control has shown great prospects in recent years. Finally, in order to meet the

收稿日期:2020-04-06;修回日期:2020-04-20.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0505303)。 [**Foundation items:** National key research and development program, No.2018YFB0505303.]

作者简介:杨存建(1967—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事遥感与GIS应用研究。E-mail: yangcj2008@126.com

major strategic needs of jointly building a global community with a shared future for mankind and the internationalization of geo-science in the new era, this paper puts forward the research on the key technologies and its applications of the global geo-science information Tupu, so that the large knowledge are intelligently and automatically discovered from big data of the geo-system through big observation, and the large knowledge is broadly applied to every aspect and every place through internet, which will support the modernization of the governance system and ability of the geo-surface system, and enhance the level and ability of geo-sciences to serve economic and social development, and highlight the characteristics and advantages of the geoscience.

Key words: Geo-Tupu; Geo-information Tupu; Knowledge discovering; Thematic information extraction; Big data; Process Tupu; Diagnosis Tupu; Tupu application

***Corresponding author:** YANG Cunjian, E-mail: yangcj2008@126.com

摘要: 本文回顾和综述了陈述彭院士关于地学信息图谱的学术思想,该学术思想来源于陈先生的科学实践。他提出了地学信息图谱的相关概念及其类型体系,地学信息图谱是地学图谱与现代信息技术结合的产物。地学信息图谱的核心在于发现地学时空知识和规律,并能为社会经济建设提供应用服务。按研究对象划分为地学各分支学科的信息图谱和各行业的信息图谱,按功能划分为:征兆图谱、诊断图谱和实现图谱。陈先生发展了地学信息图谱生成的技术方法,提出了地学信息图谱的工作流程,促进了地学信息图谱在经济社会发展中的应用。陈先生指出了发展地学信息图谱的创新方向:创新地学大数据获取技术方法,提升地学信息图谱生成智能化与自动化水平,促进地学信息图谱应用的深度和广度。陈先生指出网格地图是地学信息图谱的重要基础。该思想至今对推动地球信息科学的发展及其在解决国家重大战略需求方面,仍然具有重要的指导意义。总结了在陈先生地学信息图谱思想的指导下,在地学信息图谱方面的一些实践探索和结果,包括:发展了基于知识发现的专题信息提取和多数数据多知识协同的精细地表要素获取的技术方法,提高了水体、绿被、积雪和城乡聚落提取以及精细土地利用和精细植被类型信息获取的自动化水平和效率;拓展了时空变化图谱的研究和应用,提升了时空变化图谱生成的智能化水平和效率;地学信息图谱在社会经济发展、生态建设、环境保护和灾害风险防控等方面的应用实践已展示出了巨大前景。最后,结合新时代共建全球人类命运共同体和地球科学国际化的重大战略需求,提出了开展全球地学信息图谱关键技术与应用研究,以期实现地表大观测到大数据,再到大数据大应用的提升转化,支撑地表治理体系和治理能力的现代化,提升地学服务经济社会发展的水平和能力,彰显学科特色与优势。

关键词: 地学图谱;地学信息图谱;知识发现;专题信息提取;大数据;过程图谱;诊断图谱;图谱应用

1 引言

陈述彭院士对地学进行了广泛而深入的探索研究,发表了大量的科学论文,在科学出版社出版了专著《地学的探索》,共六卷,分别是地理学^[1]、地图学^[2]、遥感应用^[3]、地理信息系统、城市化区域发展和地球信息科学^[4]。在遥感与地球信息科学方面,陈先生推动建立了资源与环境信息系统国家重点实验室,推动了地理信息系统的专业建设和学科发展,促进了遥感与地理信息科学理论与技术的发展,推动了遥感与地理信息科学在解决国家重大需求方面的应用发展^[5-6]。陈先生提出了地学信息图谱,其地学信息图谱的学术思想至今对地球信息科学的发展,及其在解决国家重大战略需求方面,仍然具有重要的指导意义。为此,通过阅读陈先生发表的地学信息图谱方面的科学论文,分析陈先生关于地学信息图谱的学术思想,深入理解地学信息图

谱方面的理论技术,回顾总结了在陈先生地学信息图谱思想启发下的实践探索,结合地球科学全球化发展的需求,就地学信息图谱的未来发展提出了设想和建议。

2 陈述彭院土地学信息图谱学术思想概述

2.1 地学信息图谱相关概念及创新方向

陈先生提出了地学信息图谱的相关概念,形成了体系,并指出了地学信息图谱的创新方向^[7]。地学信息图谱中的图是指地图,它是地表要素的空间表达;谱指系统,如家谱,以树状结构图表描述,便于追根溯源,反演历史演变过程;图谱合一,则是时间与空间动态变化的统一描述。地学图谱是既表示地学要素过程又表示其空间差异的地图,在时间演化过程的系统过程中,同时表达空间差异的地

图,都可以称为地学图谱。地学图谱的内涵是地学要素的时空脉络及其耦合关系。传统地学分析和GIS空间分析是挖掘发现地学图谱的部分手段。地学图谱在于揭示地理要素的时空规律,并能为社会经济建设提供应用服务。地学信息图谱是地学图谱与信息技术结合的产物,如图1所示。地学信息图谱能快速汇集数据,提炼时空脉络,提高发现地学时空知识和规律的效率,可用于再现历史,预测虚拟未来,快速生成科学的可视化的时空决策方案,供决策者使用,并能对方案的实施效果进行监测评价,从而支撑实现资源环境社会经济的可持续发展。

陈先生指出地学信息图谱的创新有:①在地学大数据获取上进行创新;②在图谱生成过程智能化与自动化上进行创新;③在向决策者提供再现过去和预测未来的多种设想与可能方案方面进行创新。

2.2 地学信息图谱的类型

陈先生阐述了地学信息图谱的多个类型案例,丰富了地学信息图谱的内涵^[8]。陈先生提出了过程图谱(如温度过程)、分异图谱(如陈先生在腾冲景观遥感中提出了分层分类的二叉树方法)、弦旋律图谱(如因地形地势而左右摆动的通道路线,随着科学技术的发展,最终裁弯取直,像拨动的弦左右振动后,终于平静直下来;又如河床演变谱,在一些节点的控制下,循环往复,出现“三十年河东,四十年河西”的现象)、分形图谱(如海岸线河流的描述,多尺度关联性描述)、区域图谱(如区域格局谱、大地构造谱、区域农田景观谱和城市景观谱)和地带图谱(如气候和植被的水平带谱、垂直带谱、海洋的

地带性动态图谱、冰盖变化谱和北半球洋流大回环详情图谱)等。

地球是一个复杂的巨系统,不仅组成要素众多,且关系复杂,因此,地学信息图谱的类型划分是多种的。按研究对象划分为:大地构造图谱、水系图谱、热带气旋图谱、气候和植被的垂直带谱以及植物图谱;还可以扩展到温度图谱、降雨图谱、土壤图谱、聚落图谱、交通图谱、工业图谱和农业图谱等。

按表达内容特征划分为:区域类型组合型和时序动态组合型。区域类型组合型着重揭示区域因子间的相互关系,反映其空间格局,如西北绿洲农业与四级洪积、冲积扇的分布一致。时序动态组合型描述区域某一现象过程之发展规律,反映其动态变化,如戴维斯提出的地貌发展轮回学说。

按功能划分为:征兆图谱、诊断图谱和实现图谱。征兆图谱的内涵是将地学要素及其关系的过去、现在和未来趋势精准落实到时空网格上。诊断图谱的内涵是将存在的问题和对策精准落实到时空网格上,是对区域问题的时空诊断,犹如医生把脉,准确查找问题,是对症开方下药的重要依据,是产生决策谱的重要基础。实现图谱的内涵是在不同的时空网格上,采取不同的方案和实施措施,并进行效果监测与评价。地学信息图谱的层次结构如图2所示。

图谱思想可以与各学科各行业结合,可从现状到过程到复杂关系的表达,再到诊断到决策到实施到评价,循环往复促进学科和行业发展。

陈先生指出诊断谱是地学信息图谱的热点和重点,诊断图谱的智能生成技术与方法是重要的生长点,需要专家系统、树状系统、灰色系统、模糊处

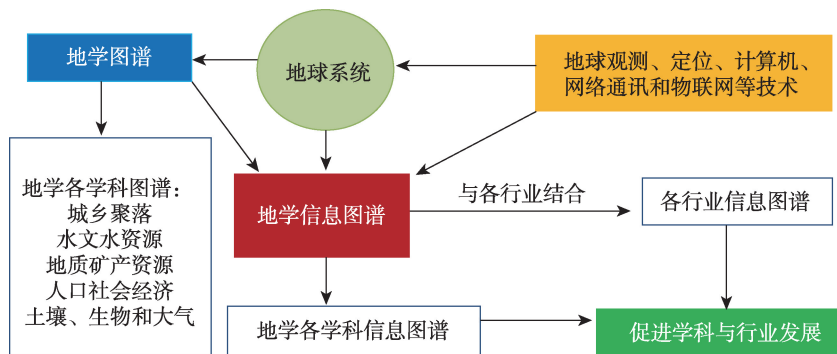


图1 地学图谱与地学信息图谱

Fig. 1 Geo-Tupu and Geo-information Tupu

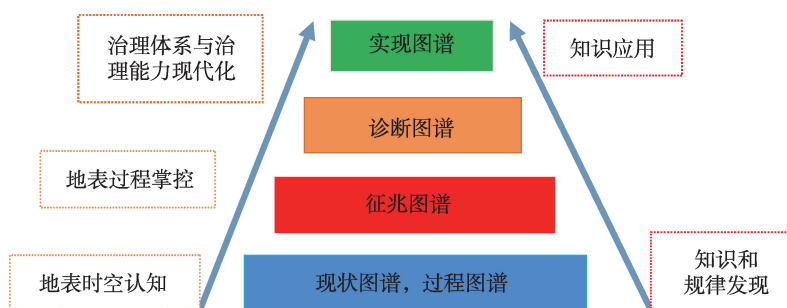


图2 地学信息图谱的层次结构

Fig. 2 Geo-information Tupu hierarchical structure

理、小波分析和遗传算法等技术方法的综合集成应用。陈先生进一步提出,要提高地学知识库的标准化和自动化水平,提高技术方法的智能化水平,还要提高管理和分析研究人员的素质,才能产生出最大的效果。

2.3 地学信息图谱方法

陈先生提出了地学信息图谱的方法^[9],阐述了中国地图的文化基因与知识创新,促进了图谱方法的发展,揭示了网格地图从井田制到计里画方演进与传播的历史启示。网格地图便于缩放、定位、定向和面积估算,易于协同遥感分析,是时空分析和图形思维的科学工具,是地学信息图谱中的重要方法,在地图分析中发挥重要作用。在数据挖掘和知识发现方面,应采用从全球到局部,逐渐详细化的逻辑思维,这符合地球系统科学的自身发展规律和对知识深入发现的逻辑。陈先生提出了中国式地学信息图谱的新构思,核心是要发现规律,并用之反演过去、预测未来。他建议要积极参与国际标准化与全球制图等活动(如承诺世界气象组织“1 km × 1 km”格网的数据交换任务)。

20世纪,国内外地学家广泛地运用时空融合的图谱法,研究空间格局的演化过程的轨迹,并认为,无论是自然还是人文,都可以通过更加抽象、概括、综合的图形思维去实现更深层次的科学凝练、转化和多维显示,获得更加简洁、一目了然的新的规律性的理解。要提高数据挖掘和知识发现的科学水平,要实现全数字化定量分析,促进地学知识发现智能化。提出要为流域水资源规划、城镇体系与城市化预测和景观生态与环境保护,有序地提供系统分析评估、模拟与预测的图件。提出了地学信息图谱的工作流程:数据获取→现状图谱→诊断图谱→

实现图谱,并举例说明了地学信息图谱方法在工程科学选址、城镇化空间发展方向决策和地球生物化学丰度制图等方面的应用成效。

2.4 地学信息图谱的发展过程

陈先生归纳总结出了地学信息图谱发展的3个阶段^[10]:景观制图实验、图谱概念的提出和地学信息图谱理论的形成。通过地理分布规律和历史发展过程2条线索,产生能把地图贯穿、交织起来,使它们成为反映区域全貌和区域特征、区域内部结构及其分异规律的图谱。地学信息图谱理论仍需进一步发展完善的。构建区域可持续发展虚拟系统是实现地学信息图谱在区域应用的有效途径。区域可持续发展虚拟系统由5个相互作用的层组成:地理信息系统、区域可持续发展模型、情景分析、战略制定和战略执行。地理信息系统用于管理、处理、分析和显示时空数据,支撑地学信息图谱的生成和管理,区域可持续发展模型(标准化模型、指标及其关系的模拟)和情景分析(可选未来、发展路径)支撑征兆图谱和诊断图谱的生成,战略制定(决策方案、实现的综合方法)和战略执行(目标、政策、组织、实践)支撑实现图谱的生成。

2.5 地学信息图谱与网格地图

陈先生阐述了网格地图的现代功能^[11],网格地图是地学信息图谱的重要基础。网格地图是将制图区域按平面坐标或按地球经纬线划分网格,以网格为单元描述或表达其中的属性分类、统计分级以及变化参数、虚拟现实以及表达动态时空变化的规律,用大小不同的网格替代多种多样的自然或行政界线。遥感像元是现代网格地图的基础。网格地图有利于促进自然与人文科学的融合、动态现象的表述以及数据融合与空间分析。网格地图与网格

计算为地学信息图谱的处理、分析、管理和表达提供了支撑。

3 基于地学信息图谱学术思想的实践探索

3.1 地学要素智能获取的实践探索

陈先生指出要在地学大数据获取上进行创新,提升地学要素获取的智能化水平。为此,开展了基于知识发现的遥感专题(水体、城乡聚落、积雪覆盖、绿色植被覆盖和云覆盖)信息提取研究。通过对多源遥感影像的地学专题要素采样分析,发现其遥感地学特征知识,先后建立了基于知识的TM影像水体提取模型^[12]、基于知识的TM影像居民地提取模型^[13]、城市城镇提取模型和农村聚落提取模型^[14]、基于知识的MODIS影像积雪提取模型^[15]和绿被提取模型^[16]、基于多时相MODIS遥感影像的四川省森林植被类型信息提取模型^[17]、基于知识发现的QUICKBIRD农村聚落提取模型^[18]、基于互补知识的SAR图像水体提取模型^[19]和DEM支持下的SAR图像水体提取模型^[20]。国内专家学者也开展了类似研究(如植被和裸土等),研发了相应的提取方法和模型^[21-23]。利用这些提取模型实现了地学专题要素信息的快速提取,提高了地学专题要素获取的自动化水平,提高了效率,为地学信息图谱生成提供了近实时的地学专题要素信息。

为了实现地表专题(森林植被、森林资源和土地利用)要素精细信息的智能获取,开展了多数据和多知识协同的专题要素精细信息的智能获取研究,如开展了多源数据协同的群系级森林植被遥感更新研究^[24],探索出了协同前期森林植被数据库、后期森林分布数据和多时相遥感数据,通过知识发现和知识应用智能化方法的研发,实现了群系级森林植被的遥感更新,从而得到后期群系级森林植被空间分布数据。开展了多源数据协同的森林资源数据库遥感更新研究和土地利用遥感更新等研究^[25],探索出了前期土地利用数据和后期遥感数据协同,通过地块分异知识的智能发现,建立基于知识的地块分割和综合模型;通过属性变化知识和地类多元特征知识的智能发现,以及大样本的智能确定和应用,通过空间智能和属性判定推理,实现了通过更新得到后期精细的土地利用空间数据,极大提高了后期土地利用数据获取的效果和效率,在一

定程度上,解决了遥感影像解译中存在的同物异谱和异物同谱的难题,实现了地学专题要素精细信息的快速更新获取,为地学信息图谱生成提供精细的地学专题要素信息,提升了自动化智能化的水平。

3.2 地学信息图谱应用的实践探索

陈先生提出要结合国家需求开展地学信息图谱的应用研究,为此,面向生态建设和环境保护,开展了退耕还林诊断谱及其空间实施谱的应用研究,利用退耕还林还草的决策知识,基于地理信息系统建立了退耕还林还草决策模型。利用土地利用、土壤侵蚀、坡度、植被指数、水体缓冲区、聚落缓冲区、生态环境质量、降雨和温度等空间分布数据和该决策模型,快速生成了退耕还林还草的空间诊断谱,揭示了需要退耕还林还草的地块空间分布。利用树木和草生长对温度和降雨条件的要求,建立模型,并利用模型生成退耕还林还草的空间实施谱^[26-28]。研究表明,该技术方法可以节约大量的人力、物力和财力,其研究结果对退耕还林还草工程的规划、实施和管理等具有较大的应用价值。开展了森林火险等级诊断谱的应用研究,利用森林火险等级评价的相关知识,建立了四川省森林火险等级评价指标体系,构建了基于地理信息系统的四川省森林火险等级评价模型和系统^[29]。利用该系统和相关空间数据,可以实时生成四川省森林火险等级空间诊断谱,为森林防火决策提供服务^[30]。国内同行也开展了地学信息图谱的应用研究,推进了地学信息图谱在地球科学、生态建设和社会经济等方面的应用发展^[31-32]。然而,如何实现地学信息图谱的实时智能主动化推送服务,仍是需要解决的问题。

3.3 地学要素时空变化图谱的实践探索

在陈先生提出的地表绿波褐波时空变化谱思想的启发下^[33],开展了地学要素(积雪覆盖、绿被覆盖和建筑覆盖)的时空变化图谱研究。如开展了积雪覆盖时空图谱研究,探索出了利用MODIS时间序列数据,智能生成年内积雪覆盖时空图谱的技术方法,揭示出了川西年内积雪时空变化的特征,揭示出了川西年内积雪覆盖的时空扩缩规律,揭示出了2002—2008年,雪线总体上呈波浪状的上升趋势的特征。该研究成果对四川省的气候研究、积雪资源利用、生态服务功能潜力挖掘、旱涝减灾和生态建设等具有重要意义^[15]。开展了川西绿被覆盖时空图谱的研究^[16],探索出了利用MODIS时间序列数

据,智能生成年内绿被覆盖时空图谱的技术方法,揭示出了川西年内绿被覆盖时空变化的特征,揭示出了川西年内绿被覆盖的时空扩缩图谱特征。从1月1日开始,绿被从东南往西北逐渐扩展,到了6月17日,达到了最西北边,并保持到8月28日,之后,开始从西北向东南退缩,直到12月26日,到了最东南边。其主要原因是温度的时空变化规律所致,此变化又受制于地球自转与公转以及地势的起伏。该研究成果对植被生长潜力挖掘、农牧生产和生态建设决策等有重要意义。开展了成都市及其周边城镇的时空扩展变化图谱研究^[34],提出反映建筑物覆盖的差值建筑物覆盖指数,并利用该指数建立了成都市及其周边城镇空间信息提取模型,利用该模型提取了2期成都市及其周边城镇的空间分布数据。将2期数据进行叠加,从而得到成都市及其周边城镇扩展的时空图谱。该图谱可以为成都市及其周边城镇的发展规划决策服务。

国内同行也开展中国土地利用变化^[35]、中国耕地时空特征变化^[36]、中国城市扩展^[37]、青藏高原湖泊面积动态^[38]、武汉市湖泊水域面积动态^[39]和中国PM_{2.5}时空演化等方面的研究^[40],这些研究在一定程度上推进了地学要素时空变化信息图谱的研究和应用,发展了一些智能化的技术和方法。然而,在标准化、自动化、业务化、全球化、知识化和应用服务主动化方面仍需持续推进。

4 思考与建议

遥感和泛在数据的获取技术为地学信息图谱研究与应用提供了海量地学大数据。如何快速汇聚、组织和存储地学大数据,使其成为有时空组织的数据,并能快速提供数据服务,这是急需解决的问题。因此,发展全球时空网格编码系统是解决此问题的重要研究方向。在图谱生成的智能化和自动化水平方面有一定的进展。但是,如何快速高效地从海量地学大数据中智能化大规模生成各类地学信息图谱,仍需发展多源数据多知识协同的地学信息图谱智能生成的相关理论,突破相关关键技术,构建相关模型和系统。发展位置关联理论,突破位置关联技术,从而支撑海量无源时空大数据的智能位置化和专题化,图谱生成的自动化,地学知识发现的智能化、应用服务的主动化。

面向国家全球战略和人类命运共同体的重大

需求,开展全球地学信息图谱理论与应用研究,发展全球地学信息图谱理论,突破全球图谱智能生成与主动服务的关键技术,构建系统和平台,实现从全球大观测到大数据、再到大知识、大图谱及其大应用的高级提升转化,为支撑调控全球地表过程提供科学的决策依据,并服务于全球可持续发展。在全球地表感知与图谱智能生成方面,需要突破多尺度多维现状图谱智能生成的关键技术;在解决全球时空尺度转化方面,需要发展全球时空尺度转化谱的理论与方法;在全球多要素时空关系谱方面,需要发展关系谱智能挖掘与发现的理论技术;在全球多维图谱组织与管理方面,需要突破基于云平台的全时空域图谱组织与管理技术;在多重时空网格的基础上,需要发展多维图谱超算技术和系统,发展知识图谱智能生成的理论与方法,突破诊断与决策谱的智能生成技术,构建基于云平台的图谱应用服务体系,提升时空决策的精快准,从而为地表空间现代治理、新型城镇化与农业现代化提供全时空域的地学信息图谱应用服务。

参考文献(References):

- [1] 陈述彭.地学的探索第一卷,地理学[M].北京:科学出版社,1990. [Chen S P. Probe into Geo-science, Volume I, Geography[M]. Beijing: Science Press, 1990.]
- [2] 陈述彭.地学的探索第二卷,地图学[M].北京:科学出版社,1990. [Chen S P. Probe into Geo-science, Volume II, Cartography[M]. Beijing: Science Press, 1990.]
- [3] 陈述彭.地学的探索第三卷,遥感应用[M].北京:科学出版社,1990. [Chen S P. Probe into Geo-science, Volume III, Remote sensing application[M]. Beijing: Science Press, 1990.]
- [4] 陈述彭.地学的探索第五卷,城市化区域发展[M].北京:科学出版社,2003. [Chen S P. Probe into Geo-science, Volume V, Urbanization and regional development[M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [5] 陈述彭,周成虎,陆锋.季风热带与亚热带地区的遥感应用实验[J].地球信息科学,2005,7(4):2-4. [Chen S P, Zhou C H, Lu F. Several remote sensing experiments in monsoon tropical and subtropical regions[J]. Geo-information Science, 2005,7(4):2-4.]
- [6] 陈述彭.新经济时代的西部开发[J].地球信息科学,2001,3(1):2-8. [Chen S P. Western development in new economic era[J]. Geo-information Science, 2001,3(1):2-8.]
- [7] 陈述彭.地学信息图谱刍议[J].地理研究,1998,17(suppl.):5-8. [Chen S P. On the map of geo-science information[J]. Geographical Research, 1998,17(suppl.):5-8.]

- [8] 陈述彭.地学的探索第六卷,地球信息科学[M].北京:科学出版社,2003. [Chen S P. Probe into Geo-science, Volume V, Geo-information Science[M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [9] 陈述彭.历史轨迹与知识创新[J].地理学报,2001,56(suppl.):1-7. [Chen S P. Along the historical way up to knowledge innovation[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(suppl.):1-7.]
- [10] 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. [Chen S P, Yue T X, Li H G. Studies on geo-information Tupu and its application [J]. Geographical Research, 2000,19(4):337-343.]
- [11] 陈述彭,陈秋晓,周成虎.网格地图与网格计算[J].测绘科学,2002,27(4):1-6,2. [Chen S P, Chen Q X, Zhou C H. Grid mapping and grid computing[J]. Science of Surveying and Mapping, 2002,27(4):1-6.]
- [12] 杨存建,徐美,黄朝永.遥感信息机理的水体提取方法的探讨[J].地理研究,1998,17(suppl.):86-89. [Yang C J, Xu M, Huang C Y. Discussion on water extraction method of remote sensing information mechanism[J]. Geographical Research, 1998,17(suppl.):86-89.]
- [13] 杨存建,周成虎. TM影像的居民地信息提取方法研究[J].遥感学报,2000,4(2):146-150,166. [Yang C J, Zhou C H. Extracting residential areas on the TM imagery[J]. Journal of Remote Sensing, 2000,4(2):146-150,166.]
- [14] 杨存建,周成虎.基于知识发现的TM图像居民地自动提取研究[J].遥感技术与应用,2001,16(1):1-6. [Yang C J, Zhou C H. Extracting residential area from TM image on the basis of knowledge discovered[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2001,16(1):1-6.]
- [15] 杨存建,赵梓健,倪静,等.基于MODIS数据的川西积雪时空变化分析[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1743-1750. [Yang C J, Zhao Z J, Ni J, Ren X L, et al. Temporal and spatial analysis of changes in snow cover in western Sichuan based on MODIS images[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011,41(12):1743-1750.]
- [16] 杨存建,赵梓健,任小兰,等.基于遥感和GIS的川西绿被时空变化研究[J].生态学报,2012,32(2):632-640. [Yang C J, Zhao Z J, Ren X L, et al. The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and Remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2):632-640.]
- [17] 杨存建,周其林,任小兰,等.基于多时相MODIS数据的四川省森林植被类型信息提取[J].自然资源学报,2014,29(03):507-515. [Yang C J, Zhou Q L, Ren X L, et al. Extracting forest vegetation types from multi-temporal MODIS imagery in Sichuan province[J]. Journal of Natural Resources, 2014,29(3):507-515.]
- [18] 杨存建,王琴,牟琳,等.基于知识发现的QUICKBIRD影像乡村聚落单元信息提取技术:中国, ZL2010 1 0142931.7[P]. 2014-01-08. [Yang C J, Wang Q, Mou L, et al. Information extraction technology of rural settlement unit in QUICKBIRD Image based on knowledge discovery: China, ZL2010 1 0142931.7[P]. 2014-01-08.]
- [19] 杨存建,周成虎.利用RADARSAT SWA SAR和LANDSAT TM的互补信息确定洪水水体范围[J].自然灾害学报,2001,10(2):79-83. [Yang C J, Zhou C H. Application of complementary information RADARSAT SWA SAR and LANDSAT TM in deciding the flood extent[J]. Journal of Natural Disasters, 2001,10(2):79-83.]
- [20] 杨存建,魏一鸣,王思远,等.基于DEM的SAR图像洪水水体的提取[J].自然灾害学报,2002,11(3):121-125. [Yang C J, Wei Y M, Wang S Y, et al. Extracting the flood extent from SAR imagery on basis of DEM[J]. Journal of Natural Disasters, 2002,11(3):121-125.]
- [21] 姚方方,骆剑承,沈占锋,等.高分辨率影像城市植被自动提取算法[J].地球信息科学学报,2016,18(2):248-254. [Yao F F, Luo J C, Shen Z F, et al. Automatic urban vegetation extraction method using high resolution imagery[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(2): 248-254.]
- [22] 李德仁,张良培,夏桂松.遥感大数据自动分析与数据挖掘[J].测绘学报,2014,43(12):1211-1216. [Li D R, Zhang L P, Xia G S. Automatic analysis and mining of remote sensing big data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(12):1211-1216.]
- [23] 李霞,徐涵秋,李晶,等.基于NDSI和NDISI指数的SPOT-5影像裸土信息提取[J].地球信息科学学报,2016,18(1): 117-123. [Li X, Xu H Q, Li J, et al. Extraction of bare soil features from SPOT-5 imagery based on NDSI and NDISI. Journal of Geo-information Science, 2016,18(1): 117-123.]
- [24] 杨存建,王琴,倪静,等.多源数据协同的精细森林植被类型信息遥感更新方法:中国, ZL 2010 10275450.3) [P]. 2013-10-08. [Yang C J, Wang Q, Ni J, et al. Remote sensing updating method of fine forest vegetation type information based on multi-source data: China, ZL 2010 10275450.3) [P]. 2013-10-08.]
- [25] 杨存建,倪静,何昭霞,等.多源时空数据协同的高精度土地利用遥感更新技术[P].中国,获授权日期:2014.5.14. [Yang C J, Ni J, He Z X, et al. High-precision remote sensing updating technology for land use based on the cooperation of multi-source spatio-temporal data [P]. China, license date: 2014.05.14.]
- [26] 杨存建,刘纪远,张增祥,等.遥感和GIS支持下的云南省退耕还林还草决策分析[J].地理学报,2001,56(2):181-

188. [Yang C J, Liu J Y, Zhang Z X, et al. Decision on afforesting and regrassing some of the dry sloping cultivated with support of GIS and remote sensing in yunnan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001,56(2):181-188.]
- [27] 杨存建,刘纪远,张增祥,等.遥感和GIS支持下的中国退耕还林还草决策分析[J].*遥感学报*,2002,6(3):205-211. [Yang C J, Liu J Y, Zhang Z X, et al. Decision-making on returning the dry upland to forest or grass Land with support of GIS and remote sensing in China[J].*Journal of Remote Sensing*, 2002,6(3):205-211.]
- [28] 杨存建,冯凉,徐育建,等.基于ARCGIS的四川省分级退耕还林还草空间决策分析[J].*自然资源学报*,2007,22(6):986-993. [Yang C J, Feng L, Xu Y J, et al. Decision on gradually reforesting and regrassing some of the dry land based on ArcGIS in Sichuan province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007,22(6):986-993.]
- [29] 杨存建,冯凉,杨洪忠,等.四川省林草火险等级评价[J].*地理研究*, 2010, 29(6):980-988. [Yang C J, Feng L, Yang H Z, et al. Study of evaluation of forest and grass fire risk grade in Sichuan Province[J]. *Geographical Research*, 2010,29(6):980-988.]
- [30] 李春艳,杨存建,周其林,等.森林防火减灾信息系统的设计开发——以四川省遂宁市为例[J].*地球信息科学学报*,2010,12(5):695-699. [Li C Y, Yang C J, Zhou Q L, et al. Study of Suining's forest fire prevention information system based on 3S[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2010,12(5):695-699.]
- [31] 邵全琴,樊江文,刘纪远,等.重大生态工程生态效益监测与评估研究[J].*地球科学进展*,2017,32(11):1174-1182. [Shao Q Q, Fan J W, Liu J Y, et al. Approaches for monitoring and assessment of ecological benefits of national key ecological projects[J]. *Advances in Earth Science*, 2017,32(11):1174-1182.]
- [32] 熊俊楠,李进,程维明,等.西南地区山洪灾害时空分布特征及其影响因素[J].*地理学报*,2019,74(7):1374-1391. [Xiong J N, Li J, Cheng W M, et al. Spatial-temporal distribution and the influencing factors of mountain flood disaster in southwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(7):1374-1391.]
- [33] 陈述彭,赵英时.遥感地学分析[M].北京:测绘出版社,1990. Chen S P, Zhao Y S. Remote sensing geoscience analysis [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990.]
- [34] 杨存建,张果,陈军,等.基于遥感的成都市及其周边城镇的扩展[J].*地理研究*,2008,(1):100-108. [Yang C J, Zhang G, Chen J, et al. The research of the sprawl of Chengdu city and its peripheral towns by using remote sensing[J]. *Geographical Research*, 2008,(1):100-108.]
- [35] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等.2010-2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J].*地理学报*,2018,73(5):789-802. [Liu J Y, Ning J, Kuang W H, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(5):789-802.]
- [36] 程维明,高晓雨,马廷,等.基于地貌分区的1990-2015年中国耕地时空特征变化分析[J].*地理学报*,2018,73(9):1613-1629. [Cheng W M, Gao X Y, Ma T, et al. Spatial-temporal distribution of cropland in China based on geomorphologic regionalization during 1990-2015[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(9):1613-1629.]
- [37] Liu F, Zhang Z X, Shi L F, et al. Urban expansion in China and its spatial-temporal differences over the past four decades[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016,26(10):1477-1496.]
- [38] 杨珂含,姚方方,董迪,等.青藏高原湖泊面积动态监测[J].*地球信息科学学报*,2017,19(7):972-982. [Yang K H, Yao F F, Dong D, et al. Spatiotemporal monitoring of lake area dynamics on the Tibetan plateau[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017,19(7):972-982.]
- [39] 马建威,黄诗峰,许宗男.基于遥感的1973-2015年武汉市湖泊水域面积动态监测与分析研究[J].*水利学报*, 2017,48(8):903-913. [Ma J W, Huang S F, Xu Z N. Satellite remote sensing of lake area in Wuhan from 1973 to 2015[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017,48(8):903-913.]
- [40] 周亮,周成虎,杨帆,等.2000-2011年中国PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析[J].*地理学报*,2017,72(11):2079-2092. [Zhou L, Zhou C H, Yang F. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11):2079-2092.]