

可靠性地理国情动态监测的理论 with 关键技术探讨

史文中, 秦昆, 陈江平, 张鹏林, 余洋, 张晓东, 胡庆武, 黄长青, 余长慧, 张文, 唐雪华, 孟庆祥, 孟令奎, 李建松

武汉大学香港理工大学空间信息联合实验室, 武汉 430072

E-mail: lswzshi@inet.polyu.edu.hk

2012-03-16 收稿; 2012-04-23 接受

国家科技支撑计划(2012BAJ15B04)、国家高技术研究发展计划(2012AA12A305)和国家自然科学基金(40801152)资助

摘要 地理国情是一个国家的社会性质、政治、经济、文化等方面的空间化、可视化的国情信息. 可靠的地理国情关系到国家重大决策的正确性. 地理国情监测是中国 2011 年制定的一个新的国家发展方向, 迫切需要提出相应的技术支撑体系. 本文分析了可靠性地理国情动态监测的基本概念, 提出了地理国情动态监测的总体研究框架, 探讨了可靠性地理国情动态监测的可靠性分析与质量控制、时空动态建模等理论和方法, 研究了空天地一体化的地理国情监测体系构建、可靠性非空间信息的空间化表达、可靠性地理国情动态变化检测、地理国情时空数据动态更新与一致性维护、地理国情动态监测数据的可靠性综合分析、地理国情动态监测的可靠性空间数据挖掘、地理国情监测辅助决策建模、可靠性地理国情监测的云计算框架、地理国情可视化技术、地理国情监测中的 GNSS 和手持终端技术、可靠性地理国情总动态评估技术等关键技术, 并总结了地理国情动态监测需要解决的核心问题.

关键词

地理国情监测
可靠性分析
时空动态建模
变化检测
时空数据
空间数据挖掘
决策建模

1 可靠性地理国情动态监测的概念

地理国情是从空间角度反映一个国家自然、经济、人文的信息, 包括国土疆域概况、地理区域特征、地形地貌特征、道路网络、江河湖海分布、土地利用与土地覆盖、城市布局 and 城镇化扩张、孕灾环境与灾害分布、环境与生态状况、生产力空间布局等基本情况. 它以地球表层的自然、生物和人文这 3 个方面的空间变化和它们之间的相互关系特征为基础内容, 对构成国家物质基础的各种条件要素进行宏观性、综合性、整体性的调查、分析和描述, 有助于充分揭示经济社会发展和自然资源环境的空间分布规律^[1~5].

地理国情监测技术是综合利用全球导航卫星系统、航空航天遥感、地理信息系统等现代测绘技术和人文社会科学调查技术, 综合各时期档案和调查成

果, 对地形、水系、湿地、冰川、沙漠、地表形态、地表覆盖、道路、城镇等要素进行动态化、定量化、空间化的持续监测, 并统计分析其变化量、变化频率、分布特征、地域差异、变化趋势等, 形成反映各类资源、环境、生态、经济要素的空间分布及其发展变化规律的监测数据、地图图形和研究报告等, 从地理空间的角度客观、综合展示国情国力^[1~5].

可靠的地理国情监测结果, 直接关系到国家的重大战略决策的正确性. 例如, 所调查国家 18 亿亩耕地面积结果的可靠性, 将直接关系到国家的粮食安全、耕地保护等重大国策的正确性. 地理国情监测技术涉及面广、过程复杂, 要实现监测结果的可靠性, 必须以可靠性理论为基础, 研究、设计可靠性地理国情监测理论、标准和技术.

可靠性地理国情动态监测旨在解决地理国情监测的可靠性问题. 通过立足地理国情监测的动态

化、定量化和空间化等特点,从可靠性分析和时空动态建模入手构建地理国情动态监测的技术体系,包括:地理国情动态监测可靠性分析与质量控制理论与方法、地理国情动态监测的时空动态建模理论与方法、地理国情动态监测的可靠性变化检测技术、地理国情时空数据动态更新与一致性维护技术、地理国情动态监测数据的可靠性综合分析及决策建模技术等。可靠性地理国情动态监测将为地理国情监测的重大国家需求提供可靠性的动态持续监测,为地理国情的科学决策提供保障。

2 可靠性地理国情动态监测的总体研究框架

可靠性地理国情动态监测从可靠性分析与质量控制入手,以地理国情的时空变化和动态监测为主线,深入研究可靠性地理国情动态监测的基础理论和关键技术,构建地理国情动态监测的技术体系。可靠性地理国情动态监测的总体研究框架主要包括两个方面:

(1) 地理国情动态监测的基础理论研究。针对地理国情动态监测的可靠性和时空动态性两大特点,研究地理国情动态监测的可靠性分析与质量控制理论以及地理国情时空动态建模理论。

(2) 可靠性地理国情动态监测的关键技术研究。针对地理国情动态监测的特点和需要,研究的关键技术包括:空天地一体化的地理国情监测体系构建、地理国情监测中非空间信息的空间化表达技术、可靠性地理国情动态变化检测技术、地理国情时空数据动态更新与一致性维护技术、地理国情动态监测数据的可靠性综合分析技术、地理国情动态监测的可靠性空间数据挖掘技术、地理国情动态监测的辅助决策建模技术、可靠性地理国情监测的云计算框架、地理国情可视化技术、地理国情监测中的 GNSS 和手持终端技术、可靠性地理国情总动态评估技术等。

3 可靠性地理国情动态监测的基础理论

3.1 可靠性分析与质量控制

地理空间数据与空间分析的可靠性和质量问题对地理国情监测结果的决策应用具有重大影响,同时也是国际上地理信息科学界的重大基础理论问题之一。美国多个国家机构(NCGIA, ESRS, UCGIS 等)

将不确定性研究列为重点方向之一。欧盟主要国家(法国、德国、英国、奥地利和荷兰等)与加拿大就空间数据不确定性研究进行了大规模、高水平的国际合作。我国国家测绘地理信息局和国家自然科学基金委员会将地理信息不确定性研究列入“十一五”计划优先领域之一。美国科学院 Goodchild 院士和中国科学院、中国工程院李德仁院士将不确定性研究列为地理信息科学的最主要基本理论之一和亟需解决的问题之一。“自然资源与环境科学中的空间精度评价国际会议”和“国际空间数据质量研讨会”已经发展成空间数据不确定性研究的两大国际系列会议。史文中^[6]提出了空间数据与空间分析的不确定性原理,其中系统介绍了不确定性理论的形成与发展;空间数据误差源以及空间数据不确定性理论主要依赖的若干基础理论;空间数据的不确定性理论模型,包括 GIS 目标的位置不确定性模型与理论,数字地面高程模型的不确定性建模,以及属性不确定性建模;不确定性关系模型和空间分析的不确定性理论;空间不确定性可视化及元数据的表达问题;以及空间不确定性理论的应用等。Shi^[7]提出了该领域的 5 个主要发展方向:遥感影像的不确定性建模;对空间数据的误差描述及质量控制;对现实世界目标识别中的不确定性建模;空间数据质量的新的数学方法;应用已提出的空间数据与空间分析不确定性理论与方法解决我们所面临的实际问题。

及时监测和掌握地理国情信息是制定国家和地区发展战略与发展规划、调整经济结果布局、转变经济发展方式、推动经济社会科学发展的前提^[8]。地理国情的可靠性和质量直接影响决策的正确性,缺少可靠性分析和质量保证的地理国情信息将无法为科学决策提供有效的支持。

基于以上分析,本文提出了地理国情动态监测可靠性分析与质量控制理论与方法研究的基本思路:通过分析地理国情动态监测中的误差源,根据误差传播机理,建立动态监测过程的误差传播模型,确立质量指标体系和数据质量模型,构建可靠性分析和质量控制理论与方法。主要研究内容应包括:(1) 地理国情动态监测不确定性传播机理与建模。通过系统分析地理国情动态监测中不确定性产生的误差源,研究不确定性的传播机理,构建量化误差传播的数学模型,为动态监测的可靠性分析和质量控制提供基础理论与方法。(2) 地理国情动态监测数据质量指

标和数据质量模型。根据地理国情动态监测的应用需求,提炼反映监测质量的共性特征,建立评价地理国情动态监测数据的质量指标体系和数据质量模型,为质量控制和质量评价奠定理论基础。(3) 地理国情动态监测可靠性分析理论。根据可靠性分析理论,评价监测过程数据和监测结果的可靠性,为发展可靠的动态监测技术与可靠的决策方法提供支持。(4) 地理国情动态监测过程质量控制理论与方法。基于最优控制与总体控制原理,提出适用于地理国情动态监测的通用质量控制理论,达到控制误差水平、提高监测数据精度的目的。

3.2 时空动态建模

地理国情具有时空动态特性,需要研究以时空数据模型为核心的地理国情数据时空动态建模的理论和方法。时空数据模型在地理信息科学领域至今仍是主要研究方向之一。早期有影响的时空数据模型主要包括时空立方体模型、序列快照模型、基态修正模型和时空复合模型等。在此基础上,国内外学者进一步提出了多种改进的时空数据模型,如面向对象的时空数据模型^[9,10]、基于事件的时空数据模型^[11]及其扩展^[12,13]、以及基于图论的时空数据模型^[14]等。迄今为止,还没有一个公认完善而能实际商用化的时空数据库系统。目前的时空数据模型研究主要是由应用驱动的,局限于具体的应用领域和范围。另一方面,在影像数据库方面的研究主要有文件存储和数据库存储两大类型,其中面向多尺度多源海量遥感影像数据库设计是关键技术之一,这方面的研究有侧重时空影像数据库的索引问题^[15]、多源影像无缝集成问题^[16]、多尺度影像集成问题^[17]等。虽然已经出现了很多种时空数据模型,但模型的通用性较差。针对地理国情涉及多领域、多尺度数据的特点,需要构建适合于地理国情动态监测的多尺度时空数据模型。

基于以上分析,本文提出了可靠性地理国情动态监测时空动态建模理论与方法研究的基本思路:通过对地理国情的时空变化过程分析,结合地理国情相关地图矢量数据和遥感影像数据的特点,研究地理国情动态监测数据的时间逻辑模型、基于事件和过程的时空表达模型,提出适合于地理国情动态监测的多尺度数据模型。主要研究内容应包括:(1) 地理国情动态监测的时间逻辑。地理国情动态监测数

据的采集、管理和应用过程具有3个时间特征,即有效时间(地理国情的现实世界时间)、事务时间(地理国情数据库时间)和应用时间(地理国情数据使用时间)。通过对地理国情动态监测3个时间逻辑关系的研究,为地理国情的时空过程表达和多尺度数据建模提供基础。(2) 地理国情多尺度时空数据模型。通过对地理国情的复杂时空变化过程进行分析,基于尺度理论,研究数据尺度和变化过程尺度,从而提出适合于地理国情动态监测的多尺度时空数据模型。(3) 基于对象的事件时空表达模型和基于场的过程时空表达模型。地理国情包括人文和自然地理现象,将地理国情的现实世界划分成事件模型和过程模型,分别利用基于对象和场的方法,研究并提出地理国情的时空表达模型。

4 可靠性地理国情动态监测的关键技术

4.1 空天地一体化的地理国情监测体系构建

现代遥感技术已经构成了一个从航天到航空的立体对地观测网络,能够获取多空间分辨率、多光谱分辨率、多时间分辨率和多传感器数据。在空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率上分别构成了从粗到细的金字塔影像。地理国情监测的实现主要依赖卫星轨道运行的复轨观测特性,航空平台是重要、灵活的补充手段。通过遥感影像,可以获取地物的位置、空间分布、几何形状等信息,检测地物几何信息的变化是遥感变化检测的主要方法。地物遥感影像变化检测属于地理国情监测的重要内容。由于卫星轨道周期不同,加上天气原因,同一颗卫星获取的不同时相影像往往难以满足变化监测的需要。因此,在实际应用中一般需要综合利用多源影像进行变化监测。基于几何特征的变化监测,多源影像之间的尺度转换和几何精度是影响监测结果可靠性的重要因素。

可靠性在以往的变化检测研究中涉及不多。要提高几何特征变化检测结果的可靠性,需要研究多源影像之间尺度转换的可靠性,提出可靠性尺度转换方法;研究多源影像几何精度的特性和误差传播规律,提出误差控制方法。利用遥感影像的光谱和辐射特性,结合地面观测数据,可以对地物特征物理量进行定量反演,通过分析物理量的差异实现地物监测是地理国情监测的重要内容。地面观测是遥感定量反演的重要工作,一般通过用卫星过境时的地面

同步观测来采集反演模型中所需要的参数. 这种同步观测往往受到条件限制, 观测的采样点有限, 反演结果检验比较困难, 可靠性较差, 限制了应用范围. 如果在地面部署无线传感器网络, 实现地面观测, 结合卫星和低空飞行遥感平台, 构成一个空天地一体的地理国情监测体系, 将有效地提高监测的效率、精度和可靠性, 易于大规模推广应用.

基于以上分析, 本文提出了空天地一体化地理国情监测体系的构建思路: 在空天地一体化的地理国情监测体系中, 利用已有的卫星和低空飞行遥感平台, 根据监测目标和需要设计与部署地面无线传感器网络. 设置地面无线传感器的观测量、观测频率、采样密度和观测时间, 配合卫星和低空飞行遥感平台过境时的同步观测, 一部分观测量用于反演计算, 另一部分观测量用于反演结果的验证和评价. 主要研究内容应包括: (1) 地物物理特征量监测无线传感器节点的研制; (2) 无线传感器网络通信机制、网络模型仿真与构建方法; (3) 无线传感器网络规划布设方法; (4) 基于无线传感器网络地面原位观测数据、卫星遥感数据以及其他空间地理信息数据时空耦合的高精度遥感反演方法.

4.2 非空间信息的空间化表达

在地理国情监测中不仅涉及空间数据, 还存在大量的非空间数据, 如历史数据、人文、社会经济统计数据等. 如何解决非空间数据的空间化计量, 是地理国情监测研究的关键问题之一.

非空间数据的网格化与空间化就是按不同经纬网格大小将全球、全国范围划分为不同粗细层次的网格, 每个层次的网格在范围上具有上下层涵盖关系. 将每个网格点的自然属性、社会属性、经济属性和文化属性都作为此网格点的属性. 社会经济数据空间化和网格化最早可上溯至 20 世纪 20 年代的计量地理方法. 1993 年 Goodchild 等人^[18]提出以 GIS 为支撑, 采用面域插值方法分配社会经济数据, Langford 和 Fisher 在 1993 年指出了当前社会经济数据空间化的一些问题. 1995 年诞生了全球人口数据库 GPW, 该数据库的前两个版本都只使用了人口数据和行政边界数据, 未考虑对人口分布产生影响的环境因素^[19]. 陈述彭院士于 2000 年前后即呼吁建立融合气象、遥感、人口和经济、自然资源和环境等要素的新一代网格数据库^[20]. 2003 年李德仁院士提出了一种适合网

格计算环境下空间信息多级格网 SIMG(spatial information multi-grid, SIMG)划分方法, 它既是空间位置的划分方法, 也是特定空间位置范围内自然、社会、经济属性的信息载体, 同时也是适合时空坐标系变化的空间信息的一种新的表示方法, 可以更方便地对空间信息资源的整合、共享与利用, 是网格化表达地理国情监测的雏形^[4,21].

基于以上分析, 地理国情监测中非空间数据空间化的基本思路是: 在充分理解社会经济、人口等非空间数据的调查、形成机制的基础上, 利用统一的土地覆被、交通等基础地理数据与非空间地理国情数据进行关联, 并制定相关的非空间地理国情数据的获取、处理和维护规范. 其主要研究内容包括: (1) 不同行业和领域的地理国情非空间数据的空间化模型研究; (2) 根据不同行业和领域分类的对地理国情监测的非空间数据, 如社会经济数据的形成机理、获取方式及决定要素、表达形式和表达内容进行规范化和标准化; (3) 根据不同行业和领域对地理国情监测统计数据的时间粒度和关联的空间粒度进行统一和规范化; (4) 空间化后的地理国情非空间数据的不确定性与可靠性检验和评价方法与体系.

4.3 动态变化检测技术

全球变化、土地利用变化以及城市发展等关系到人民生活 and 人类社会可持续发展的一系列问题在技术上集中起来可以归结为地物目标变化检测问题^[22]. 因此, 变化检测一直是地理信息科学领域中的一个研究焦点. 随着传感器技术的发展, 高分辨率、多时相、高光谱、多源数据的动态变化检测成为国内外的研究热点. 现有研究方法可以概括为先配准后变化检测的方法和图像配准与变化检测同步进行两类^[23]. 但无论是前者还是后者, 变化检测的基本思想主要是基于像素的代数及变换或是基于特征提取. 此外, 由于定量的方法可以对同一物理量根据不同时相的观测值进行反演, 并根据定量值的差异发现变化. 结合 GIS 中的本底数据进行 GIS 引导下的变化检测方法是近年来的另一个新的发展趋势. 现有的检测方法在针对特定数据和应用方面取得了相当的理论与方法上的进步, 但是对于数据源、变化检测过程及结果的可靠性问题考虑不够, 很难保证所得监测结果的高可靠性.

针对地理国情动态变化检测的现状, 本文提出

可靠性地理国情动态变化检测技术研究的基本思路: 基于空天地一体化地理国情监测体系获取的高空间和时间分辨率数据, 在可靠性地理配准技术基础上研究地理国情的空间上定量化的变化检测技术、实现地理国情现势信息、变迁信息和综合信息的可靠性提取。主要研究内容应包括: (1) 多尺度、多时相、多源数据的地理国情动态变化可靠性检测技术。研究影像分割、分类、融合和特征提取等技术, 建立多尺度、多时相、多源数据动态变化检测技术, 实现地理国情空间变化检测。(2) 地理国情物理量化监测方法。研究联系遥感信息与动态地学参量的物理模型, 定量地反演或检测地学或生物学信息在物理量上的动态变化。

4.4 时空数据动态更新与一致性维护技术

地理国情动态监测数据具有时空变化特性, 需要利用时空数据库动态更新与一致性维护技术进行更新和维护。目前, 空间数据更新的方法主要是利用摄影测量、遥感、GPS 等技术进行快速采集和更新, 更新方法包括时空过程方法、主动更新方法、增量更新方法等。现有的更新方法主要是针对单一数据源, 在单一尺度进行更新, 难以适用于海量、多源、多尺度的地理国情数据快速更新的要求。时空数据合并是地理国情监测数据集成的关键技术, 主要研究时空数据模型和时空数据结构、以及时空语义和数据质量等问题, 国内外学者对这些问题进行了深入研究。例如, 利用本体等语义理论研究空间信息的集成^[24]; 研究了基于概率的多尺度特征匹配方法和基于最小二乘平差的数字地图合并方法及其可靠性^[25]; 研究了基于语义解决异质异构信息多层次集成的信息冲突问题^[26]。目前, 地理国情数据动态更新和数据合并方面的研究主要集中于对传统方法的改进研究, 对于地理国情时空数据库中多尺度数据的联动快速更新和多源数据可靠性合并的研究还较少。

基于以上分析, 本文提出了地理国情时空数据库动态更新与一致性维护技术的研究思路: 通过构建高效的地理国情时空动态数据库, 研究地理国情数据的动态更新方法, 研究一致性维护中的数据冲突发现、消解与合并, 以及质量评价等关键技术, 实现多源、多尺度、多质量的地理国情监测数据的综合集成与管理。主要研究内容包括: (1) 地理国情监测数据的动态更新。针对地理国情的时空动态变化特性,

研究地理国情监测数据的动态更新方法。(2) 地理国情监测数据合并中的数据冲突发现、消解与质量评价方法。针对地理国情监测数据的多源、多尺度、多时相特点, 利用信息集成技术中的数据冲突发现与消解技术, 研究地理国情监测数据合并策略及方法。(3) 地理国情时空数据库的动态更新机制。针对地理国情动态监测数据的时空变化特性, 研究地理国情时空数据库的增量及联动更新、备份、迁移等动态更新方法, 构建地理国情时空数据库的可靠性动态更新机制。

4.5 动态监测数据的可靠性综合分析技术

空间分析是指分析、模拟、预测和调控空间过程的一系列理论和技术^[27]。地理国情监测数据综合分析是指综合运用多种统计分析和模型, 对地理国情普查数据、监测数据进行统计, 分析其空间结构、空间分布、空间关系、空间变化等方面的特征, 对包含生态环境、社会经济和地理系统等多维空间过程的模拟、预测与分析, 以及对地理要素的数量与质量统计特征、时空分布模式、发展趋势与演变规律等进行综合分析^[28,29]。

随着理论研究的发展, 时空数据处理和分析的应用模型不断深化, 已从单一领域的空间数据分析发展到多领域数据的综合分析; 从定性调查制图发展到量化的数理统计分析, 从资源与环境的静态分析发展到动态过程分析; 从事物和过程的表面描述发展到对内在规律的探求。

综合以上分析, 本文提出了地理国情动态监测数据可靠性综合分析的研究思路: 从时间和空间一体化的角度综合研究地理国情监测数据多领域的可靠性时空动态分析方法, 在分析过程中充分考虑地理国情监测数据的不确定性、多维性、多尺度性和时空动态变化特性等。主要研究内容应包括: (1) 地理国情信息单元划分与空间抽样技术。针对地理国情中连续分布的空间对象(如降水、气温等), 研究空间抽样模型, 并从样本选取方式、空间关联性及精度衡量三方面进行抽样模型的可靠性评价。(2) 地理国情多领域监测结果的相互校核分析。以地理国情变化检测结果为基础, 进行相互校核分析, 识别不同领域监测结果的差别; 研究不同领域、不同来源的监测结果的一致性校核方法, 并对校核结果进行可靠性评价。(3) 地理国情变化的驱动力分析技术。通过对地

理国情进行驱动力分析,揭示地理国情动态变化的影响因素、机制和规律.研究基于空间回归分析、主成分分析、探索性数据分析的地理国情驱动力分析方法与模型.(4)地理国情动态变化的时空过程分析.采用非线性克里格建模、空间数据分析与克里格相结合等方法对地理国情的时空变化过程进行模拟和分析.(5)地理国情动态监测的空间统计和空间格局分析技术.研究空间自相关和协相关模型等空间统计分析方法,分析地理国情对象在空间布局上的联系与差异.

4.6 可靠性空间数据挖掘技术

空间数据挖掘已成为空间信息领域的研究热点,并取得了许多重要成果^[30].可靠性空间数据挖掘是可靠性地理国情动态监测的关键技术之一,可靠性空间数据挖掘的研究主要体现在对不确定性问题的研究上.目前对于空间数据挖掘过程和结果中的不确定性研究还没有引起广泛而足够的重视.事实上,不仅空间和非空间数据自身具有不确定性,空间数据挖掘与知识发现过程中也会带来一系列不确定性,这些不确定性在空间数据挖掘过程中不断积累,从而可能会导致挖掘出来的空间知识具有较大误差甚至是错误.近年来,一些学者对空间数据挖掘的不确定性问题逐步重视起来^[31,32].在国际空间数据处理会议、欧洲地理信息系统会议等国际会议中设立了关于空间数据挖掘不确定性专题的讨论组.一些国内外有关大学设立了专门的空间数据不确定性研究机构.空间数据挖掘的不确定性主要来源于空间数据和空间数据挖掘过程中的多种不确定性,随机不确定性和模糊不确定性是其中最为主要的两种不确定性.研究空间数据挖掘及其不确定性的方法主要有:概率统计方法、模糊集方法、粗糙集方法、云模型方法等,并且通常需要综合应用多种不确定性方法.

基于以上分析,本文提出了可靠性空间数据挖掘研究的基本思路:通过分析空间数据挖掘中存在的因素,根据不确定性传播机理,建立空间数据挖掘过程的不确定性传播模型,提出空间数据挖掘的可靠性方法.主要研究内容应包括:(1)建立空间数据挖掘质量指标和空间数据质量模型.根据空间数据挖掘的数据来源和应用需求,建立评价空间数据质量的指标体系和质量模型,为可靠性空间数据挖掘奠定基础.(2)空间数据挖掘不确定性传播

机理与建模.通过系统分析空间数据挖掘中不确定性产生的来源,研究不确定性的传播机理,构建量化不确定性传播的数学模型,为可靠性空间数据挖掘提供基础理论与方法.(3)空间数据挖掘的可靠性评价方法.根据可靠性分析理论,评价空间数据本身和空间数据挖掘过程中的可靠性,为可靠性空间数据挖掘服务于决策提供支持.

4.7 辅助决策建模技术

空间决策支持是应用空间分析的知识,提取隐含于空间数据中的某些事实与关系,并以图形和文字的形式直接地加以表达,为现实世界中的各种应用提供科学、合理的决策支持.例如,在土地资源管理中,美国国家地质调查局采用卫星遥感数据对城市土地利用情况进行监测,并分析其对环境的影响,预测未来土地利用的趋势,并为决策者提供宏观层面的分析、预测和评估参考.空间决策支持的结果受数据、知识和模型等多方面要素的影响.例如,通过选择不同的样本区域进行决策支持实验,证实了样本数据不确定性将导致空间决策支持的错误^[33];通过实验发现利用可视化的交互式决策工具,整合各种利益相关人员的意见,在水资源利用问题中可以明显提高决策效率^[34];将模糊理论应用于空间多目标决策问题的研究中,构建模糊多目标决策模型,有效处理了决策过程中的模糊不确定性^[35].空间决策是对长期政策和规划的指导,现有的空间决策研究主要面向单一领域应用,而对于复杂的多领域决策问题,由于涉及到大量的时空变化、不同领域知识规律影响以及决策人员的主观判断,决策结果的不确定性明显增强^[36].开展综合性的地理国情监测,需要研究多领域多目标的综合决策分析问题,充分考虑决策结果对不同领域、不同时间、不同空间位置、不同人员造成的影响,形成有效的辅助决策建模方法.对于地理国情综合决策问题,监测数据来源于众多的领域和部门,数据量大、结构复杂,并且是动态变化的,同时还存在大量非结构化的、定性的、模糊等不确定性问题,使得决策环境具有更大的复杂性和不确定性.传统的分析模型和决策方法对于解决结构化问题、非空间决策问题是高效的,但对于解决复杂的空间决策问题往往是困难的.

基于以上分析,本文提出了地理国情动态监测辅助决策建模的研究思路:基于空间信息和空间知

识,研究地理国情动态监测辅助决策建模的方法,并分析空间决策过程中的决策信息、知识、决策准则、决策目标的不确定性问题,构建可靠的地理国情综合决策模型.主要研究内容应包括:(1)地理国情综合决策中非结构化信息的有效表示和处理方法.(2)地理国情综合决策可靠性知识的获取、表示和推理方法.(3)地理国情综合决策的多准则动态评估和预测方法.(4)地理国情综合决策的多目标空间规划与优化配置方法.(5)地理国情空间决策的可视化表达方法.

4.8 云计算技术

多源、多时相、多类型、海量的地理国情数据要求进行分布式管理和快速处理分析.云计算是一种以虚拟化技术为基础,通过提供服务的方式实现计算资源按需动态分配的新兴计算模式.“云”是由各种易于获取和使用的虚拟化资源,包括应用软件、操作平台和硬件设施等所构成的大型资源池,这些资源可以动态配置和调整,从而得到最优化利用^[37].空间信息云计算可为各种时空决策应用提供强大的技术支持,以较低的单位资源使用成本部署和提供快速地理数据处理能力,提供更加灵活的地理信息服务^[4].分布式非关系型数据库是随着云计算提出而得以发展的一种数据存储技术,由于关系型数据库在处理地理国情监测数据常见的影像、文档等非结构化数据时在数据库的伸缩性、数据存储结构复杂性以及数据查询效率的不足^[38],同时已有研究表明非关系型数据库在对海量非结构化数据的管理和索引中可以起到较好的效果^[39,40],因此有必要研究云计算环境下的非关系型数据库分布式存储技术以及海量影像、文档等非结构化数据的索引机制.另一方面,地理国情动态监测的实现,要求提高地理国情监测数据处理和分析的能力,高性能地学计算是解决海量数据处理问题的常用手段.但是,一般的并行计算架构 MPI 并非针对空间分析与数据挖掘设计,基于云计算出现的 MapReduce 并行计算模型,尽管已经出现了 Apache Pig 和 Apache Mahout 等数据分析框架,提供 K 均值、中值漂移、模糊 K 均值等一般数据挖掘方法,但同样尚未支持空间数据的挖掘与分析,因此面向空间数据挖掘与分析的高性能计算框架还有待进一步的研究与实现.实验证明云计算的虚拟化技术对高性能计算的影响极小^[41],虚拟化造成的额

外计算开销大约在 20%以内^[42],仍适用于大规模数据处理.研究云计算技术,有助于充分组织地理国情监测的各类计算资源,完善地理国情监测数据的存储和管理机制,提高地理国情监测数据的处理与分析能力.

基于以上分析,本文提出了可靠性地理国情监测云计算框架的基本研究思路:通过研究虚拟化技术,构建可靠性地理国情监测的云计算平台,研究云计算平台下的地理国情监测数据存储模型和时空快速索引方法,并结合已有的空间数据处理与分析并行算法,提取算法的共性特征,设计云计算环境下的空间数据高性能处理与分析架构,最终形成可靠性地理国情监测的云计算框架,从而满足对地理国情监测数据快速处理的需求.主要研究内容应包括:(1)针对地理国情数据的多源性、海量性特征,结合非关系型数据存储技术,研究地理国情监测数据的分布式虚拟化存储方法.(2)针对地理国情监测数据的多尺度、多时相特征,结合高性能计算技术,研究地理国情监测数据快速索引方法.(3)针对地理国情监测数据处理和分析需求,研究海量时空数据计算的共性问题,建立云环境下的地理国情监测数据高性能计算架构.

4.9 地理国情可视化技术

1987 年,美国自然科学基金委员会发表了科学计算可视化的报告,此后可视化受到了极大的关注,并且被视为具有广泛应用前景的技术^[43].科学计算可视化自提出以来,迅速发展为一个新兴学科,其理论和技术对地学信息的表达和分析产生了巨大的影响.可视化是利用计算机图形学和图像处理技术,将数据转换成图形或图像在屏幕上显示出来,并进行交互处理的理论和方法.它涉及到计算机图形学、图像处理、计算机视觉、计算机辅助设计等多个领域,是研究数据表示、数据处理、决策分析等一系列问题的综合技术.可视化技术作为有效的抽象信息展现工具被广泛地用来辅助人们理解和分析海量数据.在可视化技术的基础上相继提出了数据可视化、信息可视化、知识可视化等相关概念和技术^[44].可视化的表现形式从传统二维的、静态的地图表示向三维的、动态的虚拟环境的模拟和再现转变.三维可视化因能将人们难以直接感知的空间现象直观地表达出来,能获得各种超越现实的空间感知经验,因而得到了

广泛的应用. 地理国情信息是空间化、可视化的国情信息, 地理国情可视化是以可视化的理论和方法为基础, 针对地理国情的空间分布特点和时空变化特点, 将海量的地理国情信息以直观的、视觉化的形式展现出来, 并进行可视化分析, 从而为地理国情监测的分析和决策提供友好的可视化交互环境.

基于以上分析, 本文提出了地理国情可视化技术需要解决的相关问题和研究思路: 通过研究科学可视化的理论和方法, 并结合地理国情监测数据的空间化和可视化特点, 基于视觉认知机理和三维可视化的理论和方法, 研究地理国情动态监测的可视化理论和方法, 为地理国情动态监测提供可视化承载环境. 主要研究内容应包括: (1) 地理国情监测数据的多尺度可视化表达方法. 针对地理国情监测数据的多源、多尺度特点, 将多源地理国情监测数据进行信息融合, 基于多尺度理论和科学可视化理论, 研究地理国情监测数据的多尺度可视化表达方法. (2) 地理国情监测信息的多维可视化分析方法. 地理国情监测数据具有海量、多维特性, 需要研究地理国情监测数据在二维空间(x, y)、三维空间(x, y, z), 乃至四维空间(x, y, z, t)或高于四维的超维空间中进行可视化分析, 充分利用计算机的科学可视化能力, 以及人的视觉感知和超维思维能力, 研究地理国情监测数据在多维空间的可视化及人机协同分析方法. (3) 地理国情监测时空变化信息的动态模拟技术. 地理国情监测数据具有动态变化特点, 研究地理国情监测信息的时空分布和变化规律, 研究基于虚拟现实和仿真技术的地理国情动态变化视觉模拟和再现方法.

4.10 地理国情监测中的 GNSS 和手持终端技术

GNSS(Global Navigation Satellite System, 全球导航卫星系统)是一个综合的卫星导航系统, 包括 GPS, GLONASS, Compass, Galileo 等在内的综合星座. GNSS 具备全天候连续提供全球高精度导航的能力^[45], 因此, GNSS 是地理国情高精度监测的重要技术手段. 事实上, 卫星导航及其终端技术已经广泛应用于测量、定位与导航等领域. 但随着卫星数量不断增加, GNSS 网络不断完善, 应用层面上对数据精度要求也在不断提升, GNSS 及其手持终端技术在地理国情综合监测中的可靠性与完备性有待进一步的提高.

针对地理国情动态监测对数据实时动态获取的

要求, 为使 GNSS 及其手持终端在地理国情监测中的发挥更加有效的作用, 需要从以下几个方面展开研究: (1) GNSS 数据评估技术, 分析评估 GNSS 数据的质量以为空间决策提供高可靠性监测数据. (2) GNSS 数据融合技术, 通过融合 GNSS 中各导航系统的数据以减少或消除单一星座系统的误差, 从而提高地理国情监测的可靠性. (3) 手持终端监测数据的传输技术, 手持终端具有存储容量小、计算性能相对较低的特性, 在地理国情监测中如何实时将手持终端监测的数据传输到数据中心与本底数据进行配准、融合和叠加分析是地理国情监测中需要解决的关键技术问题之一.

4.11 地理国情总体动态评估技术

由于地理国情的复杂性、综合性和非线性, 地理国情各部分的情况是不能直接相加和对比的, 这就为地理国情总体动态测定和评估带来了一定的困难性. 因此, 建立可客观、定量化评价可靠性地理国情总体动态综合评价模型和评价方法, 是实现可靠性地理国情的定量化分析、内在联系分析及其综合判断的关键技术之一.

5 总结

可靠性地理国情动态监测是由地理信息科学衍生而来的一个新的研究、应用和发展方向. 可靠性和时空动态性是其两大主要特点. 可靠性问题、快速响应问题及一致性问题为地理国情动态监测需解决三大核心问题.

地理国情动态监测特别是可靠性地理国情动态监测不仅是国家的重大战略, 也是一项国际学术前沿, 需要完备的技术体系, 深厚的理论方法为可靠性地理国情动态监测的发展提供支撑. 其主要分支理论与技术包括动态监测空间数据的可靠性理论、可靠性非空间信息的空间化表达方法、空间目标的可靠性动态检测技术、时空过程的动态建模理论、时空数据库的更新与一致性检验、可靠性空间分析与空间数据挖掘、时空数据的可视化表达等.

地理国情监测将成为土地资源监测、环境监测、农情监测、森林和湿地监测、地震监测、水文监测、海洋监测、矿产资源监测、气象监测等领域的持续性工作, 可靠性地理国情动态监测将为这些领域的专业监测以及多领域的综合监测提供可靠性保障.

致谢 作者衷心感谢陈俊勇院士、李德仁院士以及相关同仁的交流与合作。

参考文献

- 徐德明. 监测地理国情, 服务科学发展. 人民日报, 2011.3.29
- 徐德明. 开展地理国情监测是新时期的新使命. 见: 中国测绘宣传中心, 编. 地理国情监测与探索. 北京: 测绘出版社, 2011. 9
- 陈俊勇. 地理国情监测: 地理国情监测研究与探索. 北京: 测绘出版社, 2011. 19–25
- 李德仁. 论地理国情监测的技术支撑. 见: 中国测绘宣传中心, 编. 地理国情监测研究与探索. 北京: 测绘出版社, 2011. 19–25
- 史文中. 浅析地理国情监测的进展与研究方向. 见: 中国测绘宣传中心, 编. 地理国情监测研究与探索. 北京: 测绘出版社, 2011. 141–148
- 史文中. 空间数据与空间分析不确定性原理. 北京: 科学出版社, 2005
- Shi W Z. Principle of Modeling Uncertainties in Spatial Data and Spatial Analyses. New York: Taylor & Francis Group/CRC Press, 2009
- 李维森. 搞好试点、做好示范、扎实开展地理国情监测工作. 见: 中国测绘宣传中心, 编. 地理国情监测研究与探索. 北京: 测绘出版社, 2011. 12–16
- 龚健雅. GIS 中面向对象时空数据模型. 测绘学报, 1997, 26: 289–298
- 舒红, 陈军, 杜道生, 等. 面向对象的时空数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22: 229–233
- Peuquet D J, Duan N. An event-based spatial temporal analysis of geographical data. Int J Geogr Inf Syst, 1995, 9: 7–24
- 孟令奎, 赵春宇, 林志勇, 等. 基于地理事件时变序列的时空数据模型研究与实现. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28: 202–207
- 牛方曲, 朱德海, 程昌秀. 改进基于事件的时空数据模型. 地球信息科学, 2006, 8: 104–108
- 尹章才, 季霖, 艾自兴. 基于图论的时空数据模型研究. 测绘学报, 2003, 32: 169–172
- Tzouramanis T, Vassilakopoulos M, Manolopoulos Y. Multiversion linear quadtree for spatio-temporal data. In: Proceedings of ADBIS-DASFAA'00. London: Springer-Verlag, 2000. 279–292
- 王密, 龚健雅, 李德仁. 大型无缝影像数据库管理系统的设计与实现. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28: 294–299
- Guo X Y, Liu S H, Qu Y H, et al. Remote sensing image standardization management and spatio-temporal scale integration. In: Proceeding of IGARSS'04. Oakland: IEEE Computer, 2004. 3861–3863
- Goodchild M F, Anselin L, Deichmann U A. A framework for the areal interpolation of socioeconomic data. Environ Plann A, 1993, 25: 383–397
- 胡云锋, 王倩倩, 刘越, 等. 国家尺度社会经济数据格网化原理和方法. 地球信息科学学报, 2011, 13: 573–578
- 陈述彭, 陈秋晓, 周成虎. 网格地图与网格计算. 测绘科学, 2002, 27: 1–6
- 李德仁, 朱欣焰, 龚健雅. 从数字地图到空间信息网络——空间信息多级网格理论思考. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28: 542–650
- 周启鸣. 多时相遥感影像变化检测综述. 国际摄影测量与遥感动态, 2010, 6: 1–8
- 李德仁. 利用遥感影像进行变化检测. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(增刊): 7–12
- 安杨, 赵波. 基于本体的空间信息集成. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(增刊): 90–93
- 童小华, 邓慷慷, 史文中. 基于概率的地图实体匹配方法. 测绘学报, 2007, 136: 210–217
- 屈振新, 唐胜群. 信息集成中冲突的语义解决方案. 计算机科学, 2010, 137: 167–169
- 王劲峰, 武继磊, 孙英君, 等. 空间信息分析技术. 地理研究, 2005, 24: 464–472
- Carroll S S, Cressie N. Spatial modeling of snow water equivalent using covariances estimated from spatial and geomorphic attributes. J Hydrol, 1997, 190: 42–59
- 张继贤. 地理国情监测技术方案. 见: 中国测绘宣传中心, 编. 地理国情监测与探索. 北京: 测绘出版社, 2011. 250–254
- 李德仁, 王树良, 李德毅. 空间数据挖掘理论与应用. 北京: 科学出版社, 2006
- Shi W Z, Wang S L, Li D R, et al. Uncertainty-based spatial data mining. In: Proceedings of Asia GIS Association'03, Wuhan, 2003. 124–135
- Stein A, Shi W Z, Bijker W. Quality Aspects in Spatial Data Mining. Boca Raton: CRC Press, 2010
- Mishalani R G, Gong L. Optimal infrastructure condition sampling over space and time for maintenance decision-making under uncertainty. Transport Res B-Meth, 2009, 43: 311–324
- Jankowski P. Towards participatory geographic information systems for community-based environmental decision making. J Environ Manage, 2009, 90: 1966–1971

- 35 Boroushaki S, Malczewski J. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. *Comput Geosci*, 2010, 36: 302–312
- 36 Polasky S, Carpenter S R, Folke C, et al. Decision-making under great uncertainty: Environmental management in an era of global change. *Trends Ecol Evol*, 2011, 26: 398–404
- 37 Vaquero L M, Rodero-Merino L, Caceres J, et al. A break in the clouds: Towards a cloud definition. *Comput Commun Rev*, 2009, 39: 50–55
- 38 Leavitt N. Will NoSQL databases live up to their promise? *Computer*, 2010, 43: 12–14
- 39 Xiao Z, Liu Y. Remote sensing image database based on NOSQL database. In: *Proceedings of Geoinformatics'11*, 2011, 1–5, doi: 10.1109/GeoInformatics.2011.5980724
- 40 Li Q, Zhang T, Yu Y. Using cloud computing to process intensive floating car data for urban traffic surveillance. *Int J Geogr Inf Sci*, 2011, 258: 1303–1322
- 41 Youseff L, Wolski R, Gorda B, et al. Evaluating the performance impact of Xen on MPI and process execution for HPC systems. In: *Proceedings of VTDC2006*. Washington D C: IEEE Computer Society, 2006, 1, doi: 10.1109/VTDC.2006.4
- 42 Qiu X, Ekanayake J, Beason S, et al. Cloud technologies for bioinformatics application. In: *Proceedings of MTAGS'09*. New York: Association Computing Machinery, 2009, 10
- 43 Van Wijk J J. Views on visualization. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2006, 12: 421–432
- 44 Zhang J, Zhong D, Zhang J. Knowledge visualization: An effective way of improving learning. In: *Proceedings of ETCS 2010*. Washington D C: IEEE Computer Society, 2010. 598–601
- 45 秦红磊, 梁敏敏. 基于 GNSS 的高轨卫星定位技术研究. *空间科学学报*, 2008, 28: 316–322

Key theories and technologies on reliable dynamic monitoring for national geographical state

SHI WenZhong, QIN Kun, CHEN JiangPing, ZHANG PengLin, YU Yang, ZHANG XiaoDong, HU QingWu, HUANG ChangQing, YU ChangHui, ZHANG Wen, TANG XueHua, MENG QingXiang, MENG LingKui & LI JianSong

Joint Spatial Information Research Laboratory, The Hong Kong Polytechnic University and Wuhan University, Wuhan, 430072

National geographical state is on spatial-related national state regarding social nature, politics, economy and culture of a nation. The reliability of national geographical state is a crucial issue which will affect the correctness of a national strategic decision and planning. Reliable monitoring of national geographical state is thus a new research direction scientifically and with an urgent demand by the country. In this paper, the research on reliable dynamic monitoring of national geographical state is proposed, including basic concepts, general research framework, key technologies and theories, and core problems to be solved. The proposed key technologies and theories for reliable geographical state monitoring include reliable analysis and quality control of dynamic monitoring, spatial-temporal dynamic modeling, integrated space-air-ground monitoring system, geographical grid-based representation of non-spatial data, change detection, dynamic update and consistency maintenance of spatial-temporal data, reliable analysis, reliable data mining, reliable decision-making, cloud computing framework, geo-visualization and techniques of GNSS and handheld devices for monitoring data capture.

national geographical state monitoring, reliable analysis, spatio-temporal dynamic model, change detection, spatio-temporal data, spatial data mining, decision modeling

doi: 10.1360/972011-2467