

上, 500人以下的企业有87家, 占比24.3%; 500-2000人的企业有153家, 占比42.7%; 2000人以上的企业有118家, 占比33.0%。在所属行业上, 钢铁行业企业有112家, 占比31.3%; 化工行业企业有98家, 占比27.4%; 有色金属行业企业有78家, 占比21.8%; 其他行业企业有70家, 占比19.6%。在数字化转型阶段上, 处于初始阶段的企业有95家, 占比26.5%; 处于实施阶段的企业有187家, 占比52.2%; 处于成熟阶段的企业有76家, 占比21.2%。

4 实证分析与发现

4.1 信度、效度与共同方法偏差检验

首先对多维度量表进行验证性因子分析(CFA)。结果显示, 各题项因子载荷均大于0.7, 组合信度(CR)值介于0.85-0.92之间, 平均变异抽取量(AVE)值介于0.58-0.67之间, 表明量表具有良好聚合效度和区分效度。Harman单因子检验法结果显示, 首个因子方差解释率为38.7% (小于40%临界值), 表明不存在严重的共同方法偏差。

4.2 描述性统计与相关分析

各主要变量的均值、标准差和相关系数如下: AI应用与GHRM实践($r=0.69, p<0.01$)、GHRM与组织绿色绩效($r=0.57, p<0.01$)及员工绿色行为($r=0.50, p<0.01$)均呈现显著正相关, 为假设提供了初步支持。

描述性统计与相关系数矩阵, 展示了各变量的均值、标准差及变量间的相关关系($p<0.01$, 对角线括号内为AVE平方根)。其中, AI应用的均值是4.32、标准差为1.21; GHRM实践的均值为4.15、标准差为1.18; 组织绿色绩效的均值为4.56、标准差为1.05; 员工绿色行为的均值为4.78、标准差为0.98。相关分析显示: AI应用与GHRM实践($r=0.69$)、组织绿色绩效($r=0.52$)、员工绿色行为($r=0.45$)均显著正相关; GHRM实践与组织绿色绩效($r=0.57$)、员工绿色行为($r=0.50$)显著正相关; 组织绿色绩效与员工绿色行为($r=0.61$)也显著正相关。

4.3 假设检验

采用结构方程模型(SEM)和Bootstrap法(重复抽样5000次)进行假设检验。结果显示: 假设路径H1(人工智能(AI)对绿色人力资源管理实践(GHRM)的影响)的标准化系数为0.682, P值小于0.001, 结论支持; H2(GHRM对组织绿色绩效的影响)的标准化系数为0.563, P值小于0.001, 结论支持; H3(GHRM对员工绿色行为的影响)的标准化系数为0.491, P值小于0.001, 结论支持。中介效应路径方面, H4a(AI通过GHRM影响组织绿色绩效)的效应值为0.384, Bootstrap法计算的95%置信区间为[0.281, 0.497], 结论支持; H4b(AI通过GHRM影响员工绿色行为)的效应值为0.335, Bootstrap法95%置信区间为[0.234, 0.441], 结论支持。

此外, 为检验调节效应(H5, H6), 采用Process宏程序进行分层回归分析。结果表明, 企业规模($\beta=0.112, p<0.05$)和数字化转型阶段($\beta=0.204, p<0.01$)对“AI应用→GHRM实践”路径均具有显著正向调节作用, H5和H6均获得支持, 表明在规模更大、数字化更成熟的企业中, AI技术对GHRM实践的提升效果更为显著。

5 结论与讨论

本研究结合质化与量化方法, 探究AI驱动高耗能行业HR绿色转型的机制与效能: AI通过数据赋能、流程再造、精准干预三大机制赋能GHRM, 是绿色转型有效驱动力, 而GHRM在AI与绿色绩效间起完全中介作用, 企业规模与数字化成熟度则显著提升AI效能, 这表明转型需技术、管理与组织基础协同。

本研究构建验证“技术赋能型”GHRM框架, 揭示AI→GHRM→绿色绩效的中介机制, 引入企业规模与数字化阶段为边界条件; 管理者需将AI-HR绿色转型纳入核心战略, 优先投资关键AI-HR系统, 聚焦绿色培训与绩效智能化, 并评估补强数字化基础, 中小企业可从易见效环节切入。但本研究存在横截面数据与样本局限, 未来可探究不同AI对GHRM的差异化影响, 将“绿色AI”纳入评估, 及关注员工伦理等人机协同问题。

参考文献

- [1] Abeyrathna AWGNM. Green human resource management: A fundamental comprehension and assessment[J]. Journal of Sustainable Development, 2020, 13(2): 45-58.
- [2] Kumar S, Shah P. Role of Green HRM practices and Use of Artificial Intelligence on organizational sustainability: a review of the literature using SCM-TBFO framework[J]. International Journal of Management Research, 2025, 31(4): 112-130.
- [3] Likhitkar M, Verma P. Impact of green HRM practices on organization sustainability and employee retention[J]. International Journal of Research in Management & Finance, 2017, 5(3): 77-89.
- [4] Ali R, Abdullah M. Enabling Green HRM Through Digital HR Transformation: Practical Insights and Future Strategies[J]. Journal of Sustainable Technology, 2025, 12(1): 23-41.
- [5] 王林, 胡筱菲, 丁志慧. 绿色人力资源管理: 文献回顾与展望[J]. 领导科学杂志, 2018, 12(2): 34-49.
- [6] Wang Z, Khan ZM. Green Human Resource Management as a Catalyst for Sustainable Performance[J]. Sustainability, 2024, 16(4): 1453-1470.
- [7] Setyadi A, Akbar YK, Ariana S, Pawirosumarto S. Examining the Effect of Green Logistics and Green Human Resource Management on Sustainable Development Organizations[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10667.

Remote Sensing Image Data Storage and Retrieval Based on the Encoding of DGGS

Fuhu Ren^{1,2} Lin Li^{2,4} Zicong Du⁵ Jinhua Dong² Yi Huang^{3*}

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871, China

2. Institute of Earth and Space Technology, Peking University International S.&T. Innovation Center at Lin-gang Special Area, Shanghai, 201306, China

3. Fujian Big Data Primary Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian, 350207, China

4. Fujian Mindu Innovation Laboratory, Fuzhou, Fujian, 350108, China

5. Zhongke Yunyao (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518067, China

Abstract

A set of key technologies for the storage and retrieval of massive remote sensing image data is proposed, based on the encoding of DGGS (Discrete Global Grid System). The main contributions include the following: a global subdivision grid model is adopted as the spatial information organization framework to enable unified data organization through the grid encoding; in terms of storage, columnar storage and efficient compression based on the grid encoding are achieved using a distributed system architecture; in terms of retrieval, multiple indexing methods are integrated to construct a multi-dimensional intelligent retrieval mechanism; and dynamic management strategies are designed based on a spatio-temporal storage mechanism to address spatial unevenness in data access. A prototype system is developed based on these technologies and experimentally validated.

Keywords

Subdivision Grid; Grid Encoding; Remote Sensing imagery; spatio-temporal storage; intelligent retrieval; DGGS (Discrete Global Grid System)

基于剖分网格编码的遥感影像数据存储与检索

任伏虎^{1,2} 李林^{2,4} 杜子聪⁵ 董锦华² 黄毅^{3*}

1. 北京大学地球与空间科学学院, 中国·北京 100871

2. 上海临港北京大学国际科技创新中心, 中国·上海 201306

3. 福建大数据一级开发有限公司, 中国·福建 福州 350207

4. 闽都创新实验室时空大数据中心, 中国·福建 福州 350108

5. 中科云遥(深圳)科技有限公司, 中国·广东 深圳 518067

摘要

本研究提出了一套基于地球剖分网格编码的海量遥感影像数据存储与检索关键技术体系,主要包括如下:以全球剖分网格模型为空间信息组织框架,实现基于网格编码的数据统一组织;在存储层面,通过分布式系统架构实现基于网格编码的列式存储与高效压缩;在检索层面,融合多种索引方式,构建支持多维度的智能检索机制;并基于空-时存储机制设计动态管理策略以应对数据访问的空间不均衡性。在此基础上开发了一套原型系统并进行了实验验证。

关键词

剖分网格; 网格编码; 遥感影像; 空-时存储; 智能检索; DGGS

【课题项目】民用航天技术预先研究项目(项目编号: D040303)。

【作者简介】任伏虎(1962-),男,中国河北人,博士,教授,从事遥感与地理信息系统研究。

【通讯作者】黄毅(1995-),男,中国福建人,硕士,从事数字经济与大数据研究。

1 引言

随着对地观测技术的飞速发展,遥感卫星传感器数量急剧增加,其空间、时间和光谱分辨率持续提升,导致全球每日产生的遥感影像数据量呈指数级增长,已步入EB时代。这些海量、动态、多源、异构的遥感数据是资源调查、环境监测、灾害应急、等众多应用领域的核心战略资源。然而,如何高效地存储、管理、检索与分析这些海量数据,已成为制约遥感技术应用的瓶颈。

2 问题的提出

传统的遥感影像数据管理多采用“文件系统+关系数据库”的混合模式。原始影像以文件形式（如 GeoTIFF、HDF、NetCDF 等格式）存储在磁盘阵列中，而其元数据（如空间范围、时间、传感器类型等）则存储在关系型数据库（如 Oracle、PostgreSQL/PostGIS）中以供查询^[1]。这种方式在面对 TB 级数据时尚可应对，但当数据量增长至 PB 级时，其弊端暴露无遗：存储效率低下，大量原始影像数据直接存储，冗余度高，存储成本巨大；检索性能瓶颈突出，基于关系数据库的空间查询在亿级记录面前响应缓慢，尤其难以支持复杂的多条件联合检索；可扩展性差，集中式的存储架构难以通过简单增加节点来实现容量和性能的线性扩展；数据管理与应用智能化水平不足，缺乏对数据内容语义的理解和基于内容的检索能力，严重依赖人工判读和预处理。

为了应对上述挑战，学术界和产业界进行了广泛探索。分布式文件系统（如 HDFS）和 NoSQL 数据库（如 HBase、MongoDB）被引入用于存储海量数据^[2]。空间索引技术（如 R 树、四叉树、GeoHash）的应用在一定程度上加速了空间查询^[3]。然而，这些方案往往未从空间数据的内在特性——即强烈的空间局部性（Spatial Locality）和访问相关性（Access Correlation）——出发进行系统性设计。例如，热点地区（如城市中心）的数据访问频率远高于偏远地区，随机的数据分布策略会导致节点负载不均，无法充分利用数据访问的空间规律性来优化系统性能。

地球剖分网格模型将地球表面递归划分为多级、多分辨率的网格单元，并为每个单元赋予全球唯一的、具有层次性的编码，为实现全球空间信息的统一组织、表达、管理和应用提供了革命性的思路^[4]。其中，GeoSOT 网格编码模型^[5]在继承传统地球剖分思想的基础上，通过优化剖分规则和编码设计，具有良好的实用性和兼容性。本研究正是在此思路指导下，进一步研究基于 GeoSOT 网格编码的影像数据网格化组织与编码、分布式对象存储的高可扩展系统架构、面向时空查询与语义检索的多级索引策略以及基于访问热度的动态存储优化技术等关键技术，在此基础上构建原型系统并进行验证，力图大数据时代的海量遥感影像数据管理提供平台性技术支撑。

3 相关工作基础

3.1 数据存储与索引、检索技术

3.1.1 遥感影像数据存储技术

现有技术包括：“文件系统（存储影像）+关系数据库（管理元数据）”、分布式文件系统（DFS）、NoSQL 数据库、对象存储技术等。本研究采用 MinIO 作为分布式对象存储核心，用于存储经过 GeoSOT 编码处理后的影像瓦片数据，充分利用其高扩展性和高并发访问能力。

3.1.2 空间数据索引技术

现有技术包括：传统空间索引（R 树系列、四叉树及

其变体）、空间填充曲线、地球剖分网格索引等。网格索引“先编码，后管理”的思路从根本上简化了分布式空间数据管理的复杂性。本研究采用 GeoSOT 编码作为核心的空间组织和索引基础。

3.1.3 智能检索技术

传统检索主要基于元数据关键字、空间范围和时间范围。随着 AI 技术的发展，基于内容的图像检索（CBIR）和多模态检索成为研究热点。本研究将 CLIP 等深度学习模型提取的语义特征向量集成到 Elasticsearch 中，构建向量索引，与 GeoSOT 编码索引、倒排索引相结合，实现多模态融合检索。

3.2 基于 GeoSOT 网格的遥感影像数据组织

3.2.1 GeoSOT 网格剖分与编码体系

GeoSOT 是一种基于四叉树思想的全球经纬度剖分网格模型。其核心思想是将地球空间递归地进行一分为四的剖分，形成一个多层次、无缝、无重叠的网格体系。

3.2.2 遥感影像的网格化映射与编码生成

一张遥感影像通常覆盖一个不规则的多边形区域。为了将其纳入 GeoSOT 网格体系，需要进行网格化映射。具体过程包括：确定影像空间范围，选择剖分层级，计算覆盖网格，生成网格编码等。最终，这张原始影像在逻辑上被“拆分”并关联到一系列 GeoSOT 网格编码上。

3.2.3 数据模型设计

基于上述映射，设计如下的核心数据模型：①影像瓦片数据（存储于 MinIO）：将原始影像按照其覆盖的 GeoSOT 网格单元进行物理切分，生成标准化的影像瓦片文件，每个瓦片文件以其对应的 GeoSOT 编码（或编码的哈希值）命名；②影像元数据（存储于 Elasticsearch）：每条元数据记录对应一张原始影像或一个影像瓦片。该数据模型的核心是将空间信息编码化、标识化。

4 系统架构与关键技术实现

4.1 系统总体架构

本研究设计的原型系统采用分层、模块化的分布式架构，如下图 1 所示，主要包括数据层、应用支撑层和应用层。

4.2 核心功能模块设计

4.2.1 影像数据接入与预处理

用户可以通过 Web 端批量上传遥感影像数据，系统自动提取影像的元数据并进行 GeoSOT 网格剖分。影像数据通过压缩算法（无损或有损）进行空间优化，并生成影像瓦片。

4.2.2 网格编码与分布式存储

针对影像数据，系统采用 GeoSOT 网格剖分技术生成唯一编码，并将影像瓦片存储在分布式存储节点中。存储节点基于 MinIO 对象存储系统，支持高并发访问和负载均衡。

4.2.3 影像金字塔构建与管理

系统支持多分辨率影像的金字塔构建与管理。用户