引文格式:徐立,杨春成,刘鹏,等.三维PDF地图数据组织模型研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(5):1059-1068.DOI:10.13203/j.whugis20240227

Citation:XU Li,YANG Chuncheng,LIU Peng,et al.3D Geospatial PDF Map Data Organization Model[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(5):1059-1068.DOI:10.13203/j.whugis20240227

三维PDF地图数据组织模型研究

徐 立[1] 杨春成[1,2,3] 刘 鹏[2] 刘铭轩[3] 陈久栋[2] 戴纪龙[1]

1 中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室,湖北 武汉,430074

2 中国地质大学(武汉)国家地理信息系统工程技术研究中心,湖北 武汉,430078

3 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430078

摘 要:三维电子地图能直观、形象地表达客观世界,对提升三维地理环境的认知与表达具有重要意义。然而,传统三维电子地图通常数据量庞大、格式多样,且依赖专业软件进行浏览与操作,增加了普通用户的使用门槛。信息化时代,普通用户对便携式文档格式(portable document format,PDF)比较熟悉,其具有更好的通用性和普适性。为顺应地图应用大众化的趋势,降低三维地图的使用难度,探索并设计了一种基于PDF格式的三维地图数据组织模型。首先,归纳了三维PDF地图的概念,围绕通用三维模型设计数据组织与数据存储结构。然后,基于该组织模型分别利用地形数据、倾斜摄影数据、城市三维数据开展三维PDF地图制作实验。最后,讨论分析了该数据组织模型的典型特征。实验结果表明,所构建的三维PDF地图图面清晰、表达美观,既保留了地图的基本功能,又具备PDF文档的轻量化与易传播特性,有助于扩大三维电子地图的用户群体并拓展其应用场景。

关键词:三维PDF地图;地图数据组织模型;通用三维数据模型

中图分类号:P283 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-09-25

DOI:10.13203/j.whugis20240227 **文章编号**:1671-8860(2026)05-1059-10

3D Geospatial PDF Map Data Organization Model

XU Li[1] *YANG Chuncheng*[1,2,3] *LIU Peng*[2] *LIU Mingxuan*[3] *CHEN Jiudong*[2] *DAI Jilong*[1]

1 Key Laboratory of Geological Survey and Evalution of Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2 National Engineering Research Center of Geographic Information System, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

3 College of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

Abstract: **Objectives**: Three-dimensional (3D) electronic maps offer significant advantages in representing the objective world with high fidelity and intuition, playing a pivotal role in the abstract simulation and cognitive analysis of complex 3D geographical environments. However, traditional 3D electronic maps often suffer from massive volumes, heterogeneous formats, and a heavy reliance on specialized geographic information system (GIS) software, which collectively impose a high technical threshold for non-professional users. In the era of informatization, ordinary users are familiar with the portable document format (PDF), and the PDF format has emerged as a globally recognized standard due to its cross-platform compatibility and high universality. To adapt to the trend of popular map application and lower the barrier for ordinary users to use maps, this paper explores the design of a new type of 3D map data organization model, namely the 3D geospatial PDF map data organization model. This model establishes a formal expression framework for 3D maps by leveraging the structural affordances of the PDF format. **Methods**: First, we established the theoretical foundation by elaborating on the conceptual framework of the 3D geospatial PDF map. This involved designing a hierarchical data organization structure that formalizes the transition from

基金项目:地质探测与评估教育部重点实验室主任基金(GLAB2022ZR01);中央高校基本科研业务费;地理信息工程国家重点实验室、测绘科学与地球空间信息技术自然资源部重点实验室联合资助基金(2023-04-12)。

第一作者:徐立,博士生,研究方向为地图制图与可视化。xl7@cug.edu.cn

通信作者:杨春成,博士,研究员。yangcc@cug.edu.cn

complex 3D map data to document-based representations. Specifically, we engineered a robust data storage schema that leverages the universal 3D (U3D) standard within the PDF object hierarchy, ensuring seamless encapsulation of 3D geometries, texture mappings, and spatial metadata. Second, to evaluate the model's robustness and cross-domain applicability, a series of mapping and analysis experiments were conducted. We utilized a diverse range of multi-source spatial datasets, including terrain elevation data, oblique photography meshes, and urban 3D models, to produce high-fidelity 3D geospatial PDF prototypes. This process validated the model's capacity to handle heterogeneous data formats and complex spatial scenes. **Results:** The experimental results demonstrate that: (1) Three 3D geospatial PDF maps are produced based on our 3D geospatial PDF map data organization model, with clear and beautiful visual effects. (2) The 3D geospatial PDF map has both basic map features and PDF lightweight features, namely map scene element visualization, geospatial reference, three-dimensional geographic entity structure, lightweight storage, lightweight form, and lightweight application. **Conclusions**: This research provides map users with a standardized and accessible 3D map solution based on the PDF format. By decoupling 3D spatial information from specialized software environments, this model significantly lowers the barrier to entry for spatial data utilization, thereby expanding the user base and broadening the application scenarios for 3D electronic maps in the digital age.

Key words: 3D geospatial PDF map; map data organization model; universal 3D model

地图是国际上公认的三大通用语言之一,已成为人类工作、学习和生活不可缺少的科学语言和工具[1]。将计算机技术引入地图学,催生了许多新的地图品种,促进了地图定义的广义化[2],如高精地图[3]、微地图[4]等。近年来,随着制图数据和制图工具的不断丰富,制图门槛降低,地图制图表现出大众化趋势[5]。同时,地图用户群体逐步扩张,广泛普通用户表现出显著的用图需求[6]。泛地图时代,迫切需要发展新的制图理论和方法以支撑大众制图[7]。

随着实景三维中国的建设和数字孪生城市的发展,三维电子地图逐步成为各项生产活动中所必需的生产资料,在更多复杂任务中承担支撑作用[8-9]。三维电子地图制作流程首先是借助3D Max等建模软件生成精细化三维模型[10],再使用Cesium、虚幻引擎等三维可视化引擎渲染三维场景,最终呈现出逼真的可视化效果[11-13]。然而,现有的三维电子地图格式多样,应用时需要使用专业地理信息系统(geographic information system, GIS)软件或可视化应用程序来实现[14],应用门槛较高,难以满足广大普通用户群体的用图需求。

针对上述地图形式创新发展的需求以及三维电子地图应用的局限性,结合便携式文档格式(portable document format, PDF)所具有的数据完整、跨平台、跨终端、多行业适用等特点[15],本文采用PDF格式为信息载体开展三维地图数据组织模型研究。目前,二维PDF地图技术已经成熟,其存储、传输和使用均不依赖于GIS[16-17],在阅读友好性、地图分析和认知功效等方面表现较好[16]。然而,二维PDF地图缺乏三维地图形象直观的优势[18-19],但它体现了地图与PDF格式结合的应用价值。利用PDF格式表达三维内容在多个领域已有相关研究。例如,将交互式三维计算机辅助设计内容扩展至三维PDF,帮助不同知识水平的用户理解机器装配过程[20],以及利用基于PDF格式的嵌入式三维技术解释说明晶体学和X射线衍射技术中的对称点群[21]等。目前,中国针对三维PDF地图的相关研究较少,但具备空间参考的三维GeoPDF产品已在国外一些部门和单位中得以应用[22-24]。然而,这类产品缺乏对于地图数据组织方法的研究或总结,难以较好地指导三维PDF地图制作与应用实践。

综上所述,开展三维PDF地图数据组织模型研究十分必要,本文探索设计一种新型三维PDF地图数据组织模型,推动三维电子地图走向更广泛的用户群体。

1 三维PDF地图数据组织模型设计

1.1 三维PDF地图概念

三维PDF地图是一种基于PDF格式、具备地理空间参考的三维地图产品,能够以三维电子地图的形式表达客观现实世界。相较于传统的三维电子地图,三维PDF地图继承了PDF格式的固有优势,具有以下特点:(1)跨平台与跨系统应用。PDF格式与平台、系统无关,能够跨平台、

跨系统保持显示效果一致,不需要考虑终端设备的适配问题。(2)数据完整性。地图所有数据均存储在 PDF 格式内部,最终表现为一个独立自包含的 PDF 文档。PDF 格式具备存储文字、图像、几何对象的能力[25-26],保障了地图的数据完整性。(3)易于共享。基于 PDF 格式使用地图,直接面向具体应用,不同行业的用户均能实现零培训使用与分享地图。

1.2　三维 PDF 地图数据组织结构

三维 PDF 地图数据组织结构指的是采用 PDF 格式以三维电子地图形式表达客观现实世界的方法。

1.2.1　三维 PDF 地图地理实体表达

地理实体概念既方便了地图数据组织,又符合用户认知世界与理解地图。三维 PDF 地图具有表达地理实体概念的能力,即表达客观世界中具有空间位置、统一属性的独立地物。数据组织结构对地理实体的抽象表达是实现地图表达的基础。如图 1 所示,三维 PDF 地图采用基础图元-地理实体-三维 PDF 地图的方式去组织数据。作为地图分类分层的基本单元,三维 PDF 地图地理实体面向实体建模,由多个类型的基础图元组成,通过点、线、面等不同形态要素来表达。

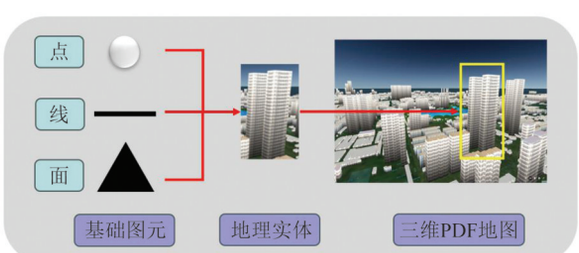


图 1　三维 PDF 地图地理实体示意图

Fig. 1　Diagram of 3D Geospatial PDF Map Geographical Entity

几何信息、位置信息和属性信息是三维地理 PDF 地图地理实体空间信息所包含的主要内容。其中,几何信息采用点、线、面等形式,利用坐标或坐标串来记录;位置信息采用相对位置和绝对位置来描述,相对位置的描述是将不同地理实体相互之间的空间关系进行相对表达,绝对位置的描述通常基于投影转换来实现;属性信息则主要记录地理实体的部分文本描述内容,如名称、分类等。

1.2.2　三维 PDF 地图组织架构

三维 PDF 地图组织架构的设计思想是利用 PDF 结构中的三维插图和地图空间参考字典来组织地图数据。如图 2 所示,三维插图是 PDF 文档格式组织三维地图数据的关键对象,包含 3 个必要结构,分别为三维注释、三维流和三维视图。其中,三维流用于存储三维地图数据,先利用通用三维模型(universal 3D,U3D)[27]对地图中的地理实体等内容进行组织存储,再将 U3D 嵌入到三维流中。此外,地图空间参考字典是描述地图投影与坐标系信息的结构,用于空间参考转换与地图可视化。

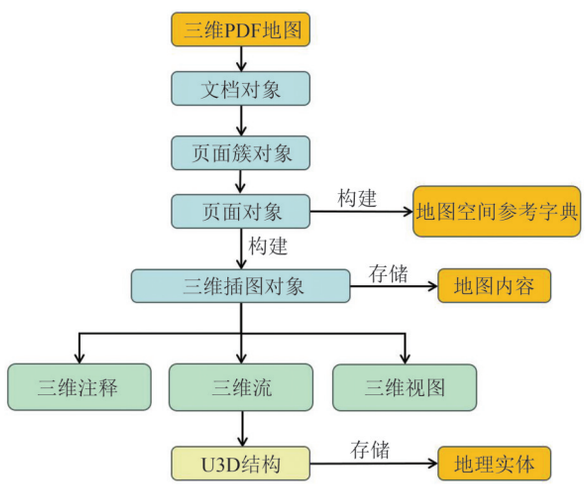


图 2　三维 PDF 地图组织架构

Fig. 2　Organizational Structure of 3D Geospatial PDF Map

1.3　三维 PDF 地图数据存储结构

三维 PDF 地图数据存储结构遵循 PDF 格式规范来设计实现,由 PDF 格式和 U3D 数据模型共同决定。

1.3.1　三维 PDF 地图数据存储方式

PDF 格式存储数据时仅支持 8 种数据存储对象,分别是字典、布尔、数值、字符串、名称、数组、流和空值,其中字典对象是键值对形式,值允许是任意类型的数据存储对象[28]。

如图 3 所示,三维 PDF 地图数据存储结构是利用 PDF 格式 8 种数据存储对象对三维 PDF 地图组织架构的具体实现。其中,三维注释是访问三维插图结构的入口,利用字典对象记录三维地理 PDF 地图的相关描述信息,如地图制作单位、制作时间等;三维流是 U3D 数据经过压缩编码后在 PDF 格式中的存储位置,主要存储三维 PDF 地图中几何、材质、纹理、光照等内容;三维视图同样利用字典对象来描述三维 PDF 地图的视图信息。地图空间参考字典用于记录基准面、椭球体、地理坐标系统、投影坐标系统和单位等三维 PDF 地图空间参考信息。总体而言,三维 PDF 地图数据存储结构通过 PDF 规范[26]定义的

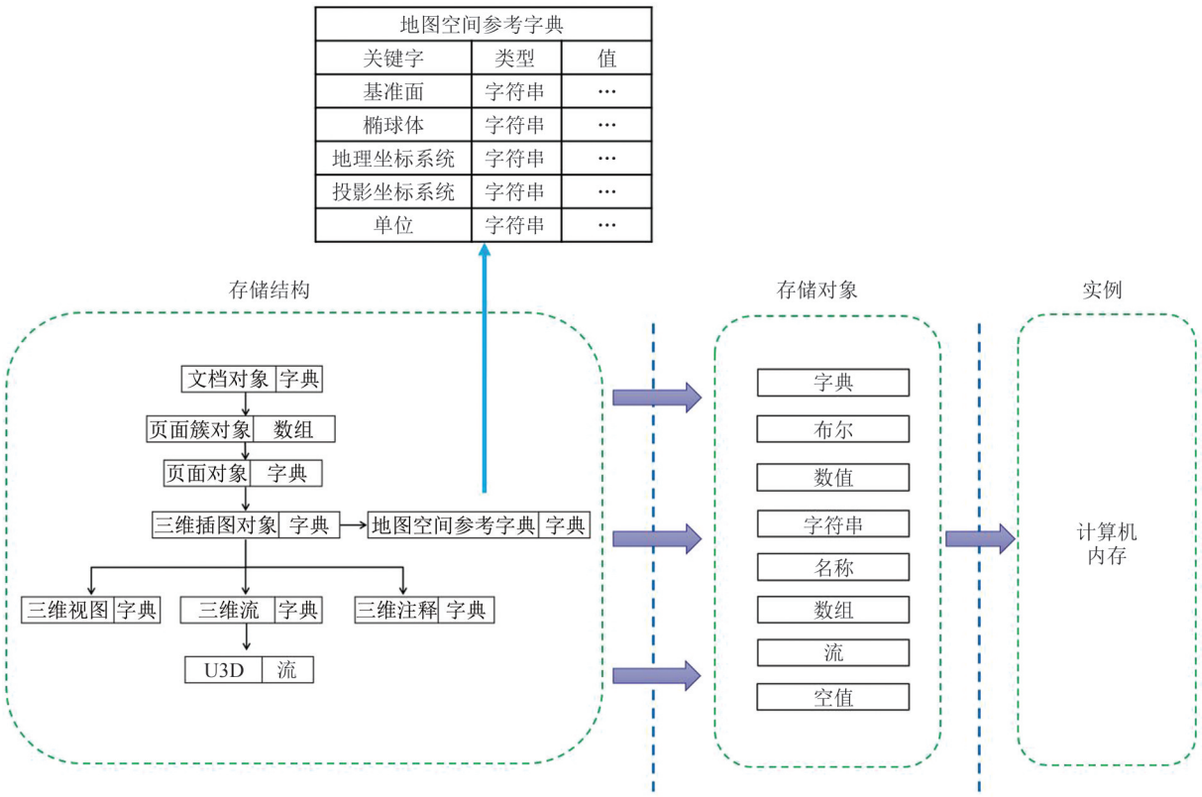


图3 三维PDF地图数据存储方式

Fig. 3 Data Storage Scheme of 3D Geospatial PDF Maps

存储对象来实现,最终构成实例存储在计算机内存中。

1.3.2 U3D数据模型

U3D数据模型是PDF规范中支持嵌入的通用三维数据模型[27-29]。利用U3D数据模型存储三维地图内容是三维PDF地图数据存储结构研究的重点。三维地图中各类实体关系复杂,利用U3D数据模型中的节点对象可以便捷地存储和管理三维地理实体,从而实现三维PDF地图内容存储。

利用U3D数据模型存储三维PDF地图内容如图4所示,场景对象是三维PDF地图的根对象,下级包含4类节点对象,分别是模型节点、视图节点、光节点、组节点。模型节点通常用于存储点集、格网以及线集3种几何类型数据,三维PDF地图多用格网类型,它包含点、面、法向量、纹理、材质等内容;视图节点是控制三维PDF地图的视图节点,用于存储用户视角信息;光节点是管理光源数据和光源资源的节点对象,三维PDF地图的光源环境参数均存放在光节点中;组节点可以管理各类节点。其中,模型节点与地理实体是1:1的关系,一个模型节点代表一个地理实体,例如图4中建筑物实体1与建筑物模型1的关系。组节点与模型节点则构成1:N的关系,一个组节点管理N个模型节点,将同一类别或具有同一特征的节点存储在组节点中,能够支撑三维PDF地图地理实体分类,例如图4中某小区建筑物包含多栋住宅楼的关系。

2 三维PDF地图数据组织实验与结果分析

实验数据包含了常见的地形地物类型,分为地形数据、倾斜摄影数据和城市三维数据。如表1所示,这3类数据中均含有几何数据和纹理数据,其中数据量最大的为城市三维数据,含有大量建筑物模型。

本文实验按照三维PDF地图数据组织模型处理实验数据,流程如图5所示。首先,解析获取实验数据中的点、线、面、纹理、材质、法向量与空间参考数据,依次存储到计算机内存结构中。然后,构造U3D数据模型,实例化三维PDF地图中各类节点对象,将内存结构中的点、线、面、纹理、材质、法向量按照三维地理实体组成关系存储入对应的节点,同时设置三维PDF地图的光照、视图等节点参数。U3D数据处理完成后,在页面对象下构建地图空间参考字典结构,以键值对的形式存储地理坐标系统、基准面、椭球体、投影坐标

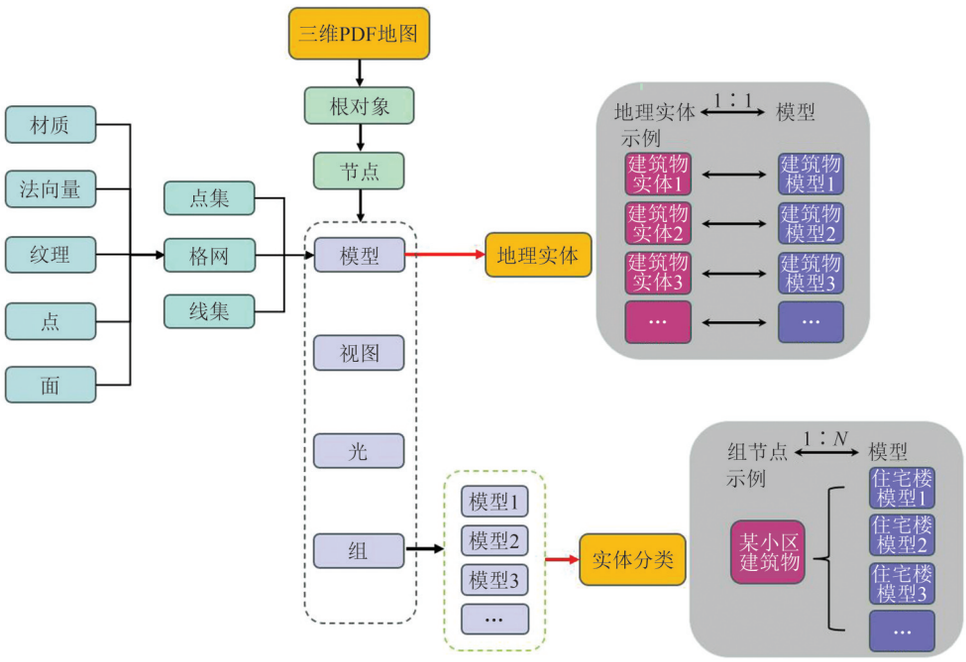


图 4　利用 U3D 数据模型存储三维 PDF 地图内容

Fig. 4　Using U3D Data Model to Store 3D PDF Map Content

表 1　实验数据

Table 1　Experimental Data

数据类型	数据描述	点数量/个	面数量/个	是否包含纹理材质
地形数据	表示地形起伏变化	263 169	524 288	是
倾斜摄影数据	基于倾斜摄影技术建模	244 903	485 382	是
城市三维数据	表示城市建筑物等内容	686 914	1 073 701	是

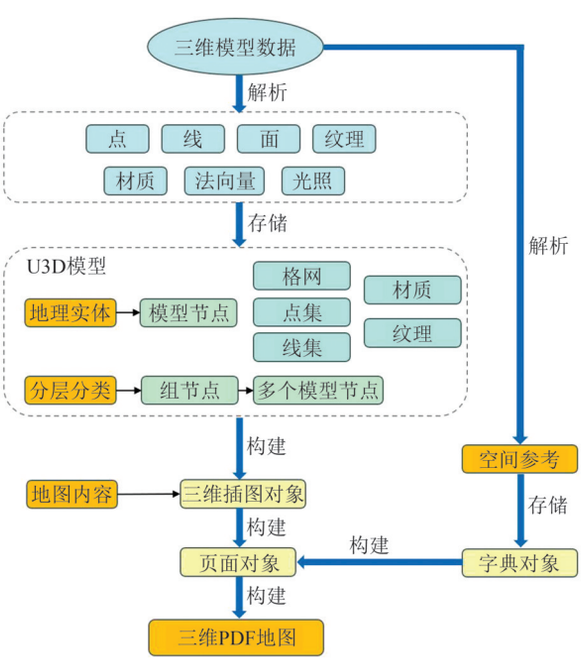


图 5　三维 PDF 地图制作原理图

Fig. 5　Diagram of 3D Geospatial PDF Map Production

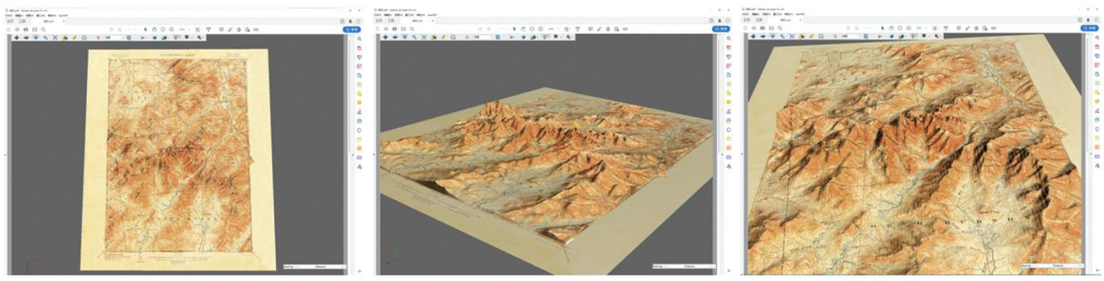
系统、单位等坐标系和投影信息，最终制作完成三维 PDF 地图，实验得到的结果如图 6 所示。使用 PDF 阅读器打开后，完整呈现出原始实验数据的内容，图面效果清晰美观，同时能够通过旋转、缩放、漫游等操作阅览三维 PDF 地图。实验结果表明，三维 PDF 地图数据组织模型设计合理有效，能够为地图用户提供一种基于 PDF 文档格式的三维地图解决方案。

3　三维 PDF 地图数据组织模型特征

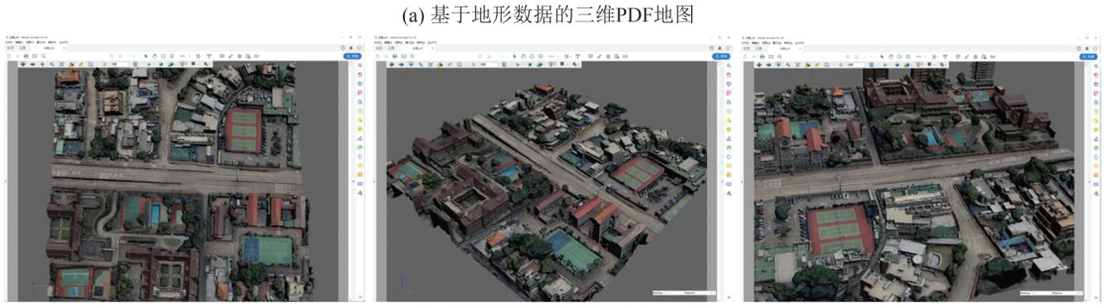
三维 PDF 地图数据组织模型基于 PDF 格式设计实现，继承了 PDF 格式的优势，且不会因载体形式的创新而缺失地图特征。

3.1　地图基本特征

如图 7 所示，三维 PDF 地图数据组织模型具有地图内容图元化、地图空间参考描述和三维地理实体结构化 3 项特征，分别指向地图学理论框架中 3 项关键内容（符号系统、地图投影和地图综合）[1]。地图内容图元化是三维 PDF 地图中构建三维地理实体和实现符号系统的基础。地图空间参考描述是指三维 PDF 地图坐标系统和地图投影。三维地理实体结构化是基于图元、实体和图层实现地图内容选择的基础。下面分别通



(a) 基于地形数据的三维PDF地图



(b) 基于倾斜摄影数据的三维PDF地图



(c) 基于城市三维数据的三维PDF地图

图6 三维PDF地图效果图

Fig. 6 3D Geospatial PDF Map Renderings

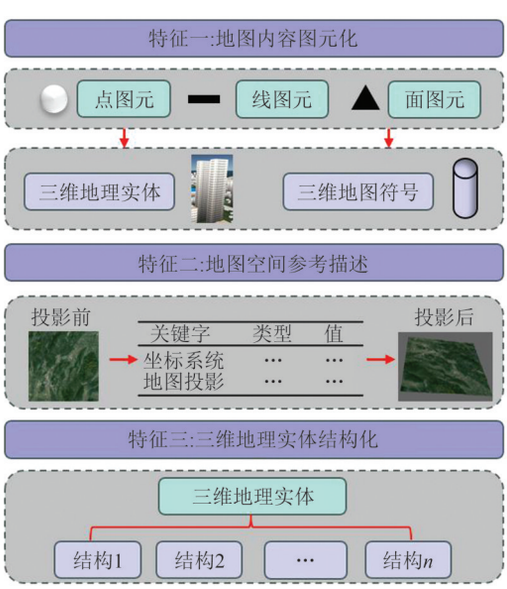


图7 三维PDF地图数据组织模型的3项地图基本特征

Fig. 7 3 Basic Map Features of 3D PDF Map Data Organization Model

过实验对地图基本特征进行验证。

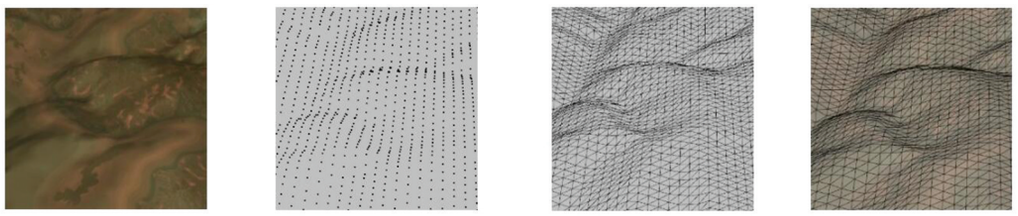
3.1.1 地图内容图元化

地图内容图元化是指三维PDF地图内容能够由点图元、线图元和面图元组合构成,它依赖U3D数据结构中的点集、线集、格网来实现。实验分别利用点集、线集、格网3种结构表示三维PDF地图中的点图元、线图元、面图元。实验效果如图8所示,该特征是构建三维地理实体的基础,将具备同一属性的点图元、线图元和面图元统一表示,实现三维地理实体的构建。

3.1.2 地图空间参考描述

三维PDF地图以独立的PDF文档形式呈现,但PDF文档格式中缺乏针对地图空间参考的特定存储结构,因此数据组织模型设计时在PDF页面对象下建立一个字典结构,用于存储地图空间参考。如表2所示,字典结构以键值对的方式存储地理坐标系统、基准面、椭球体、投影坐标系统、单位等坐标系和投影信息。

三维PDF地图数据组织模型设计了三维PDF地图空间参考的存储方式与内容,有利于明确地图坐标系统与PDF文档的页面坐标系统、地图绘制时的屏幕坐标系统之间的转换参数以及地图投影信息,有助于三维PDF地图用图者实现坐标查询、距离量算等分析功能。



(a) 地图局部图　(b) 点图元　(c) 线图元　(d) 面图元

图 8　三维 PDF 地图图元表达效果图

Fig. 8　3D Geospatial PDF Map Element Representation Diagram

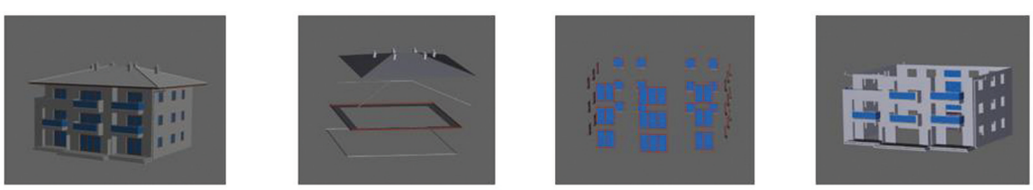
表 2　地图空间参考字典示例

Table 2　Map Spatial Reference Dictionary Example

关键字	类型	值
地理坐标系统	字符串	用于指定一个基于经纬度的坐标系
基准面	字符串	用于指定一个水平基准面
椭球体	字符串	用于指定一个椭球体
投影坐标系统	字符串	用于指定一个投影坐标系
单位	字符串	用于指定测量使用的单位

3.1.3　三维地理实体结构化

在地图内容图元化表达的支撑下,三维 PDF 地图数据组织模型支持三维地理实体结构化表示,能够高保真集成各类地图模型数据,避免了无结构数据的局限与不足,例如仅具备阅览效果,无法为用图者提供地图检索和属性查询等 GIS 功能。如图 9 所示,以一个房屋模型为例,该模型由房顶、窗户和墙体组成,使用 3 个 U3D 模型节点分别存储房顶、窗户和墙体的几何数据、纹理数据等信息,再利用一个组节点将 3 个模型节点进行组合,进而构建三维 PDF 地图房屋实体。



(a) 房屋模型　(b) 房顶　(c) 窗户　(d) 墙体

图 9　三维地理实体结构化表示

Fig. 9　Structured Representation of 3D Geospatial Entities

3.2　轻量化特征

如图 10 所示,三维 PDF 地图数据组织模型具有存储轻量化、形式轻量化和应用轻量化 3 项特征。存储轻量化是指相较于原始实验数据,生成的三维 PDF 地图具有更少的数据量。形式轻量化是指三维 PDF 地图仅包含 PDF 格式呈现给用图人员,无需过多文件。应用轻量化是指三维 PDF 地图仅需 PDF 阅读器即可打开使用,无需过高用图要求。下面分别通过实验对 3 项轻量化特征进行验证。

3.2.1　存储轻量化

三维 PDF 地图基于 PDF 标准压缩机制,有效降低数据量。研究表明,标准地图成果转换成 GeoPDF 后,数据量比原先减少 80%[30]。三维 PDF 地图数据组织模型具备高压缩率的特征,在保证三维地图质量的同时,减少其所占用的存储空间,不仅能够减轻用图者终端设备的存储压力,还有利于提升数据传输效率。对象文件格式(object file format,OBJ)是一种通用三维模型格式,支持复杂几何图形表示,因此本文选择 4 类 OBJ 格式的典型三维数据制作成三维 PDF 地图,计算压缩率,对比分析压缩前后数据量大小。如表 3 所示,分别将 OBJ 格式的影像贴图地形模型、无影像贴图地形模型、贴图建筑物模型和实景三维模型进行压缩转换,制作成三维 PDF 地图。由表 3 可以看出,压缩后 4 类典型三维数据平均压缩率约为 46.31%,节约了一半左右的存储空间。影响压缩率高低的主要原因是 PDF 文档标准压缩算法对几何节点数据和贴图数据敏感。此外,压缩前后模型几何节点数目相同,数值精度无损失。

3.2.2　形式轻量化

三维 PDF 地图将地图图元信息、空间参考等内容统一组织在 PDF 文件中,以独立自包含的 PDF 文档形式呈现给用户。这种方式有利于提高数据存储的效率和移动传输过程中的安全性,降低地图内容丢失的风险。如表 4 所示,本文对比分析 OBJ、开源场景图像二进制文件

格式(open scene graph binary,OSGB)、三维瓦片3种数据格式各自的应用特点和定位,OBJ格式是一种U3D模型,能够表示复杂几何图形,OSGB则是倾斜摄影测量数据模型专业格式,三维瓦片格式主要用于大规模场景快速加载显示。这3种格式均需要多个类型文件组成,在一定程度上,这种将数据显性分块的方式会增加在地图编辑或传输时数据丢失的风险。相比之下,三维PDF地图数据模型采用基于地图逻辑的隐性分块方式,将全部内容整合于单一PDF文档中,避免了文件分散带来的管理负担与丢失隐患,有助于提高地图的可用性和可靠性。

3.2.3 应用轻量化

轻量级PDF阅读器是三维PDF地图应用轻量化的关键点。一般地,地图应用需要专业人员通过复杂的GIS软件完成。欠缺专业知识的人员与缺乏专业软件操作能力的人员在用图时受限,摆脱这种应用限制对于推进三维电子地图普及应用大有帮助。据国际PDF协会主要成员福昕软件公司官方数据显示,其直接用户数已超过6.5亿,企业客户数达42.5万以上[31],由此可见,PDF文档格式使用人群十分广泛,意味着大量用户终端已安装部署PDF阅读器,无需安装多余软件或插件。三维PDF地图利用大众熟知的PDF阅读器突破地图应用的专业限制,使普通用户零培训使用三维地图,极大地降低了对用图者的专业背景要求,简化了用图流程。相较于专业GIS软件,PDF阅读器轻量级的特性还能够降低对用户硬件设备的要求,使三维PDF地图能够适应特殊的应用环境。

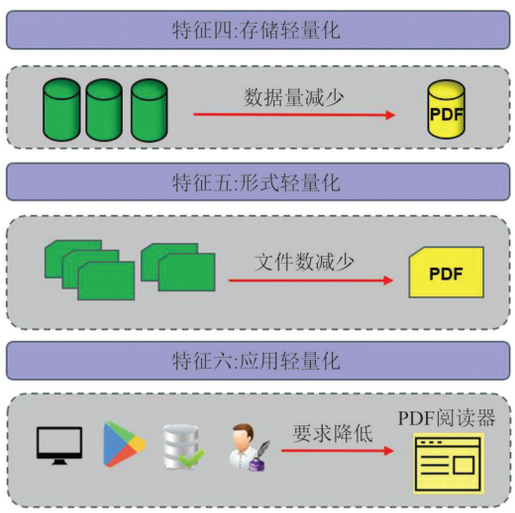


图10 三维PDF地图数据组织模型的3项轻量化特征

Fig. 10 Three Lightweight Features of 3D Geospatial PDF Map Data Organization Model

表3 三维PDF地图压缩率分析

Table 3 3D Geospatial PDF Map Compression Ratio Analysis

模型	OBJ格式/kB	PDF格式/kB	压缩率/%
影像贴图地形模型	38 649	14 283	36.955
无影像贴图地形模型	29 580	15 691	53.045
贴图建筑物模型	2 567	1 010	39.345
实景三维模型	36 932	20 644	55.897

注:压缩率计算方法是压缩后PDF文档大小与压缩前OBJ格式数据大小的比值,数值越小,说明压缩程度越大。

表4 常见的三维数据格式

Table 4 Common 3D Data Formats

三维数据格式	文件格式	内容	应用特点
OBJ	.obj	复杂模型信息	通用三维模型,支持复杂几何图形表示
	.mtl	材质库参数	
	.jpg	纹理信息	
OSGB	.xml	元数据	倾斜摄影测量数据模型专业格式
	.osgb	瓦片模型	
三维瓦片	.json	元数据	大规模场景快速加载显示
	.b3dm	大型异构三维模型	
	.i3dm	三维模型实例	
	.pnts	点云数据	
	.cmpt	组合数据	
PDF	.pdf	模型、空间参考、属性	轻量化、快速加载显示

4　结　语

本文设计了一种三维PDF地图数据组织模型。首先，详细论述了三维PDF地图的概念、数据组织结构和数据存储结构。然后，基于该数据组织模型，分别利用地形数据、倾斜摄影三维数据、城市三维数据进行了三维PDF地图制作实验。最后，讨论分析了三维PDF地图数据组织模型所具备的典型特征。实验结果表明，三维PDF地图图面清晰美观，具备地图基本特征与PDF轻量化特征，即地图内容图元化、地图空间参考描述、三维地理实体结构化以及存储轻量化、形式轻量化、应用轻量化6项特征。本文为普通地图用户提供了一种基于PDF格式的三维地图解决方案，有助于拓展三维电子地图的用户群体和应用场景。需要说明的是，尽管本文提出的数据组织模型能够支撑地图符号系统的实现，但还需要进行地图符号设计、符号库构建等工作，因此下一步研究将重点围绕三维PDF地图符号的内容，深入研究三维PDF地图符号设计、符号库构建、地图标注等问题。

参　考　文　献

[1] 刘丽伟，郭纪伟，刘会晓，等. 导航地图的二三维一体化技术研究[J]. 北京测绘，2025，39(7)：993-998.
LIU Liwei，GUO Jiwei，LIU Huixiao，et al. 2D and 3D Integration of Navigation Maps[J]. *Beijing Surveying and Mapping*，2025，39(7)：993-998.

[2] 郭仁忠，陈业滨，赵志刚，等. ICT时代地图的科学概念及表达框架[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(12)：1978-1987.
GUO Renzhong，CHEN Yebin，ZHAO Zhigang，et al. Scientific Concept and Representation Framework of Maps in the ICT Era[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(12)：1978-1987.

[3] 应申，蒋跃文，顾江岩，等. 面向自动驾驶的高精地图模型及关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2024，49(4)：506-515.
YING Shen，JIANG Yuewen，GU Jiangyan，et al. High Definition Map Model for Autonomous Driving and Key Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2024，49(4)：506-515.

[4] 王小龙，闫浩文，李精忠，等. 微地图辅助寻路的方向-距离模型构建与表达[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2026，51(2)：380-390.
WANG Xiaolong，YAN Haowen，LI Jingzhong，et al. Construction and Representation of a Direction-Distance Model for WeMap Assisted Wayfinding[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2026，51(2)：380-390.

[5] 郭仁忠，陈业滨，赵志刚，等. 泛地图学理论研究框架[J]. 测绘地理信息，2021，46(1)：9-15.
GUO Renzhong，CHEN Yebin，ZHAO Zhigang，et al. A Theoretical Framework for the Study of Pan-Maps[J]. *Journal of Geomatics*，2021，46(1)：9-15.

[6] 任福，翁杰，王昭，等. 关于智能地图制图的几点思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(12)：2064-2068.
REN Fu，WENG Jie，WANG Zhao，et al. Some Thoughts on Smart Cartography[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(12)：2064-2068.

[7] 吴明光，孙彦杰，闾国年. 地图风格迁移：概念、综述与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(12)：2069-2084.
WU Mingguang，SUN Yanjie，LÜ Guonian. Cartographic Style Transfer：Idea，Review and Envision[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(12)：2069-2084.

[8] 杜清运，王涛，任福. 试论地理信息科学的基础学科范式[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(12)：2003-2006.
DU Qingyun，WANG Tao，REN Fu. On the Basic Discipline Paradigm of Geographic Information Science[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(12)：2003-2006.

[9] 吴信才. 地理信息系统原理与方法[M]. 4版. 北京：电子工业出版社，2019.
WU Xincai. Principles and Methods of Geographical Information Systems[M]. 4th ed. Beijing：Publishing House of Electronics Industry，2019.

[10] CH/T 9015—2012. 三维地理信息模型数据产品规范[S]. 北京：国家测绘地理信息局，2013.
CH/T 9015—2012. Specifications for the Digital Products of Three-Dimensional Model on Geographic Information[S]. Beijing：The State Bureau of Surveying and Mapping，2013.

[11] 蒯希，贺彪，罗恒，等. 城市空间三维地图及其在智慧城市中的应用[J]. 测绘地理信息，2021，46(1)：66-70.
KUAI Xi，HE Biao，LUO Heng，et al. Three-Dimensional Map of Urban Space and Its Application to Smart Cities[J]. *Journal of Geomatics*，2021，46(1)：66-70.

[12] 张琛，贺彪，郭仁忠，等. 倾斜摄影三维模型Unreal Engine 4渲染的数据转换方法[J]. 武汉大学学报

(信息科学版), 2023, 48(4): 514-524.
ZHANG Chen, HE Biao, GUO Renzhong, et al. A Data Conversion Method from Oblique Photogrammetric 3D Models to Renderable Assets in Unreal Engine 4[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(4): 514-524.

[13] 黄欣然, 江文萍, 刘一飞, 等. Cesium环境中三维场景数据的加载优化策略[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(S1): 94-98.
HUANG Xinran, JIANG Wenping, LIU Yifei, et al. Optimization Strategy for Loading 3D Scene Data in Cesium Environment[J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(S1): 94-98.

[14] 王家耀. 关于地理信息系统未来发展的思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1535-1545.
WANG Jiayao. Thoughts on the Future Development of Geographic Information System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1535-1545.

[15] 周校东, 杨春成, 孟妮娜. 一种数字地图新产品: PDF地图[J]. 测绘通报, 2016(1): 108-110.
ZHOU Xiaodong, YANG Chuncheng, MENG Nina. A New Digital Map Product: PDF Map[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(1): 108-110.

[16] ZHOU X D, AI T H, MENG N N, et al. A PDF Tile Model for Geographic Map Data[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(9): 373.

[17] 胡浩杰. 地理PDF地图制图关键技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2011.
HU Haojie. Research on Key Technologies of Geographic PDF Map Drawing[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011.

[18] 何列松, 刘海砚, 黄利民, 等. 利用POM和DLG数据的矢量地理PDF地图快速制作[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 1081-1089.
HE Liesong, LIU Haiyan, HUANG Limin, et al. An Efficient Geospatial PDF Map Producing Method Using POM and DLG Data Aggregation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(7): 1081-1089.

[19] ZHOU X D, YANG C C, MENG N N, et al. A Electronic Map Data Model Based on PDF[J]. *Proceedings of the ICA*, 2018(1): 1-5.

[20] MENN J P, SELIGER G. Increasing Knowledge and Skills for Assembly Processes Through Interactive 3D-PDFS[J]. *Procedia CIRP*, 2016, 48: 454-459.

[21] ARRIBAS V, CASAS L, ESTOP E, et al. Interactive PDF Files with Embedded 3D Designs as Support Material to Study the 32 Crystallographic Point Groups[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 62: 53-61.

[22] TerraGO. GeoPDF[EB/OL]. [2024-02-20]. https://terragotech.com/.

[23] ALLORD G J, FISHBURN K A, WALTER J L. Standard for the US Geological Survey Historical Topographic Map Collection[R]. Virginia: US Geological Survey, 2014.

[24] CAPUTO R G. The GeoPDF: Creating Maps for Non-Mapper[J]. *Engineer*, 2010(1): 36-37.

[25] OGC. PDF Georegistration Encoing Best Practice[S]. [2020-06-18]. OGC, 2011.

[26] Adobe Systems Incorporated. U3D Supported Elements[EB/OL]. [2024-08-14]. http://practicalpdf.com/downloads/FloatingToolbar.pdf.

[27] ECMA International. Universal 3D File Format: ECMA-363[S]. ECMA International, 2007.

[28] Adobe Systems Incorporated. PDF Reference[EB/OL]. [2020-08-31]. http://www.adobe.com/cn/devnet/pdf/pdfreferencearchive.html.

[29] Adobe Systems Incorporated. Adobe Supplyment to the ISO 32000[EB/OL]. [2020-06-18]. https://www.adobe.com/content/dam/cc1/en/devnet/pdf/pdfs/adobe_supplement_iso32000_1.pdf

[30] 徐韬. 基础测绘GeoPDF地图新成果研究的必要性和可行性[J]. 测绘标准化, 2014, 30(2): 19-21.
XU Tao. On Necessity and Feasibility for Research of GeoPDF Products from Basic Surveying and Mapping Activities[J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2014, 30(2): 19-21.

[31] Foxit Software Incorporated. About Foxit[EB/OL]. [2024-02-14]. https://www.foxitsoftware.cn/company.