



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 三维 PDF 地图数据组织模型研究
作者: 徐立, 杨春成, 刘鹏, 刘铭轩, 陈久栋, 戴纪龙
DOI: 10.13203/j.whugis20240227
收稿日期: 2024-09-25
网络首发日期: 2024-10-15
引用格式: 徐立, 杨春成, 刘鹏, 刘铭轩, 陈久栋, 戴纪龙. 三维 PDF 地图数据组织模型研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版),
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240227>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240227

引用格式：

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),2024.DOI: 10.13203/j.whugis20240227 (XU Li, YANG Chuncheng, LIU Peng, et al. Research on 3D Geospatial PDF Map Data Organization Model[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024.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：三维电子地图表达客观世界具有形象直观的优势, 对三维地理环境的表达与认知具有重要意义。传统三维电子地图数据量大, 数据格式多样, 使用时依赖专业软件工具, 具有一定的用图难度。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, PDF格式具有更好的通用性和普适性。为适应地图大众化应用趋势, 降低普通用户用图难度, 探索设计了一种新型三维 PDF 地图数据组织模型, 基于 PDF 便携式文档格式形式化表达三维地图。首先, 归纳了三维 PDF 地图的概念, 设计了数据组织结构与数据存储结构。其次, 基于该组织模型分别利用地形数据、倾斜摄影数据、城市三维数据开展了三维 PDF 地图制作试验。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。试验表明, 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。该研究为地图用户提供了一种基于 PDF 便携式文档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。
关键词：三维 PDF 地图; 地图数据组织模型; U3D 数据模型

Research on 3D Geospatial PDF Map Data Organization Model

XU Li¹ YANG Chuncheng^{1,2,3} LIU Peng² LIU Mingxuan³ CHEN Jiudong² DAI Jilong¹

1 Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation 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: The three-dimensional (3D) electronic map has the advantage of representing the objective world in a vivid and intuitive way, which is of great significance for the abstract simulation and cognition of the three-dimensional geographical environment. Traditional 3D electronic maps have a large amount of data, diverse

收稿日期：2024-09-25

项目资助：地质探测与评估教育部重点实验室主任基金(GLAB2022ZR01)和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项目(编号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

通讯作者：杨春成, 博士, 研究员。yangcc@cug.edu.cn

data formats, and rely on professional software tools, which increases the difficulty of using maps. In the era of informatization, ordinary users are familiar with the portable document format (PDF), and the PDF format has better universality. In order to adapt to the trend of popular map application and reduce the difficulty of ordinary users to use maps, this paper explores the design of a new type of 3D map data organization model -- 3D Geospatial PDF Map Data Organization Model, which formally expresses 3D maps based on PDF format.

Methods: Firstly, we elaborate the concept of 3D geospatial PDF map, designed the data organization structure and propose the organizational structure of 3D geospatial PDF map. We also designed the data storage structure based on the PDF format and the Universal 3D (U3D) model. Secondly, based on our 3D geospatial PDF map data organization model, experiments were conducted on the production of 3D geospatial PDF maps using terrain data, oblique photography 3D data, and urban 3D data. Finally, we discuss and analyze the typical features of 3D geospatial PDF map data organization model.

Results: (1) Three 3D geospatial PDF map were produced based on our 3D geospatial PDF map data organization model, with clear and beautiful visual effects; (2) 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, storage lightweight, form lightweight and application lightweight.

Conclusions: This research provides map users with a 3D map solution based on the PDF format, which is helpful to expand the user group and application scenarios of 3D electronic map.

Key words: 3D Geospatial PDF Map; Map Data Organization Model; U3D Data 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]。自计算机技术引入地图学以来，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。近些年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^[5-6]。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^[7]。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^[8]。

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^[9-12]。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^[13]，再使用 Cesium、Unreal Engine 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^[14-16]。然而，现有的三维电子地图格式多样，应用时需要使用专用 GIS 软件或可视化应用程序来实现^[17]，应用门槛较高，难以满足广泛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^[18]，本文拟以 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 系统^[19-21]，在阅读友好性、地图分析和认知功效等方面表现较好^[19]。然而，二维 PDF 地图缺乏三维地图形象直观的优势^[22-24]，但它体现了地图与 PDF 格式结合的应用价值。因此，开展三维 PDF 地图数据组织模型研究十分必要，利于推动三维电子地图走向更广泛的用户群体。

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 CAD 内容扩展至 3D PDF，帮助不同知识水平的用户理解机器装配过程^[25]，以及利用基于 PDF 格式的嵌入式 3D 技术解释说明晶体学和 X 射线衍射技术中的对称点群^[26]等。目前，国内针对三维 PDF 地图的相关研究较少，但具备空间参考的三维 GeoPDF 产品已在海外一些部门和单位中得以应用^[27-29]，然而这类产品缺乏对于地图数据组织方法的研究或总结，难以较好指导三维 PDF 地图制作与应用实践。综上，本文探索设计一种新型三维 PDF 地图数据组织模型。

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 地图是一种面向三维数据、具有地理空间参考的 PDF 地图产品。其基于继承了 PDF 格式的优势，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^[30-31]，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 地图数据组织结构描述了利用 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，基础图元是构成地理实体的最小组织单位，地理实体是构建地图的核心内容。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。

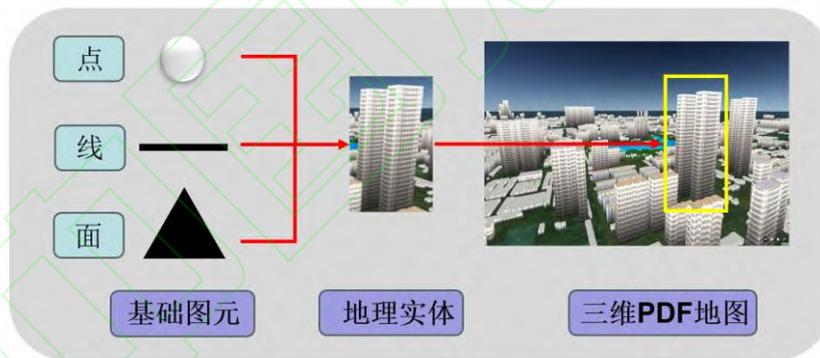


图 1 三维 PDF 地图地理实体示意图

Fig.1 3D Geospatial PDF Map Geographical Entity Diagram

几何信息和位置信息是三维地理 PDF 地图地理实体空间信息的主要描述内容。地理实体的几何信息采用点、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，确定地理实体的经纬度坐标，再换算成平面直角坐标。三维地理 PDF 地图地理实体属性描述方面，主要包含地理实体的部分语义信息，如名称、分类、几何信息（包括位置、长度、面积、体积）等，以及社会、经济等方面的属性信息。

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 3D Artwork 和地图空间参考字典来组织地图数据。如图 2 所示，三维 PDF 地图以文档 Document 为根节点，根节点下级是含有全部页面内容的页面簇 Pages 结构，之后是目标页面 Page，最终访问到用于存储与管理三维地图数据的三维对象 3D Artwork 以及地图空间参考字典 Dictionary。

3D Artwork 是 PDF 文档格式组织三维地图数据的关键对象，包含三个必要结构，分别为三维注释 3D Annotation，三维流 3D Stream 和三维视图 3D View。3D Annotation 是访问 3D Artwork 的入口，它还提供一个 3D Artwork 的观看视点；3D Stream 用于存储三维地图数据，先利用 U3D（Universal 3D，U3D）数据模型^[32]对地图中的地理实体等内容进行组织存储，再将 U3D 嵌入到 3D Stream 中；3D View 与显示相关联，它提供 3D Annotation 中视点相关参数，如视点的位置、方向、坐标系统等。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。

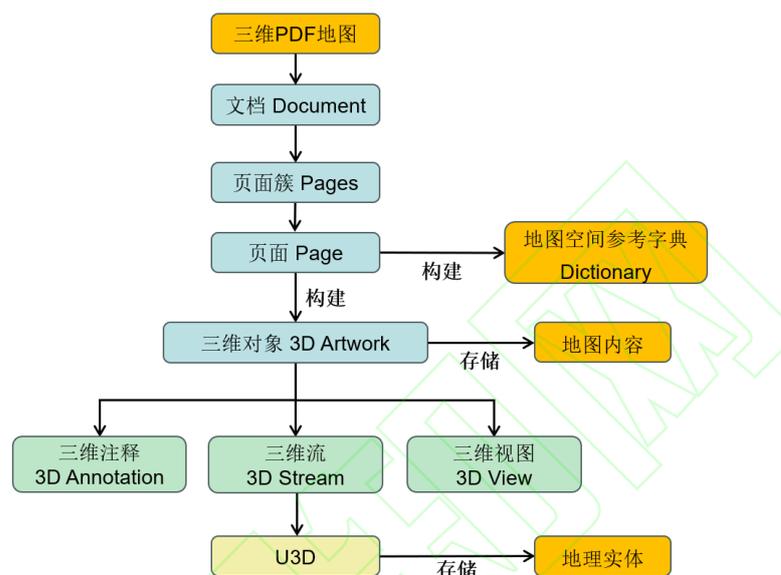


图 2 三维 PDF 地图组织架构

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八种数据存储对象，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“Key-Value”键值对形式，Key 值允许是任意类型的数据存储对象^[33]。

如图 3 所示，三维 PDF 地图数据存储结构是利用 PDF 格式八种数据存储对象对三维 PDF 地图组织架构的具体实现。其中，3D Annotation 是访问 3D Artwork 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、用图单位等。3D Stream 是 U3D 数据经过压缩编码后在 PDF 格式中的存储位置，U3D 用于具体组织存储三维 PDF 地图中几何、材质、纹理、光照等内容。3D View 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、投影坐标系统和投影单位等三维 PDF 地图空间参考信息。总体上，三维 PDF 地图数据存储结构通过 PDF 规范^[31]定义的存储对象来实现，最终构成实例存储在计算机内存中。

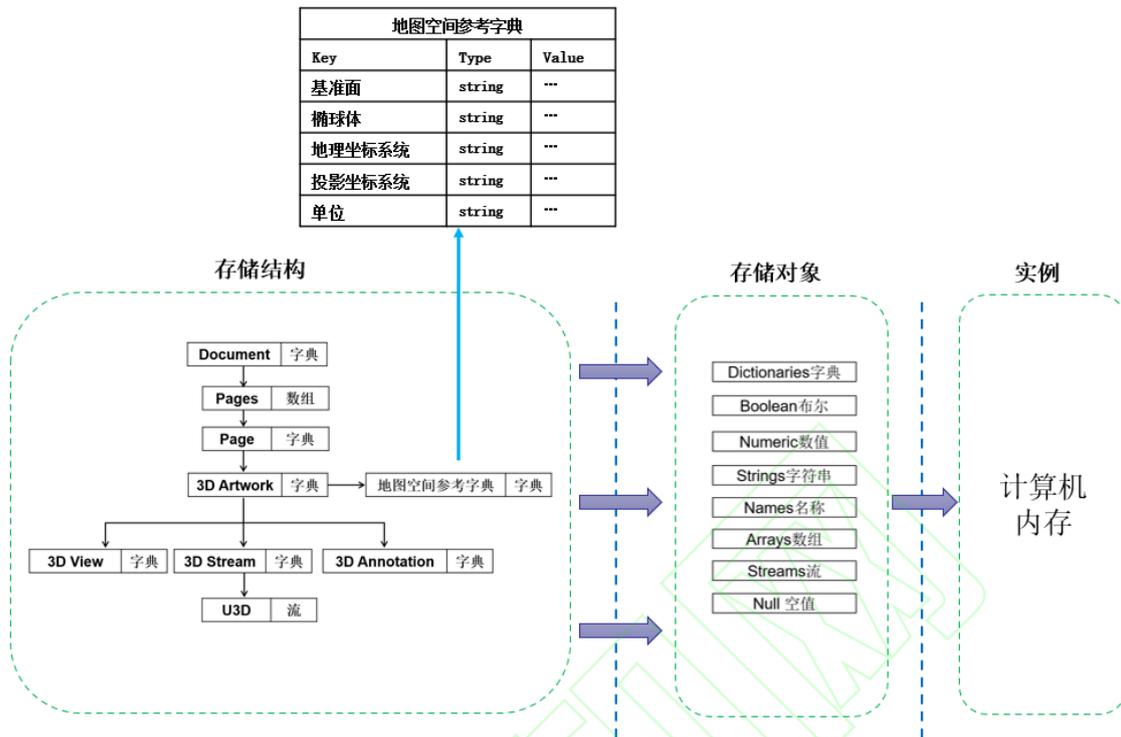


图 3 三维 PDF 地图数据存储方式

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

1. 3. 2 U3D 数据模型——三维地图内容的存储

U3D 数据模型是 PDF 规范中支持嵌入的通用三维数据模型^[31-34]，是连接三维地图与 PDF 格式的桥梁。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 Node 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，Scene 对象是三维 PDF 地图的根对象，下级包含四类 Node 节点对象，分别是 Model 模型、View 视图、Light 光照、Group 组。Model 模型节点通常用于存储 PointSet、Mesh 以及 LineSet 三种几何类型数据，三维 PDF 地图多用 Mesh 类型，它包含点 (Point)、面 (Face)、法向量 (Normal)、纹理 (Texture)、材质 (Material) 等内容。Model 模型节点与地理实体是 1:1 的关系，例如图 4 中建筑物实体 A 与建筑物模型 A 的关系。一个 Model 模型节点中可以存放多个几何类型数据，用于构成一个完整三维地理实体。View 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。Light 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 Light 节点中。Group 组节点可以管理各类节点，能够与 Model 模型节点构成 1:N 的关系，将同一类别或具有同一特征的节点存储在 Group 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。

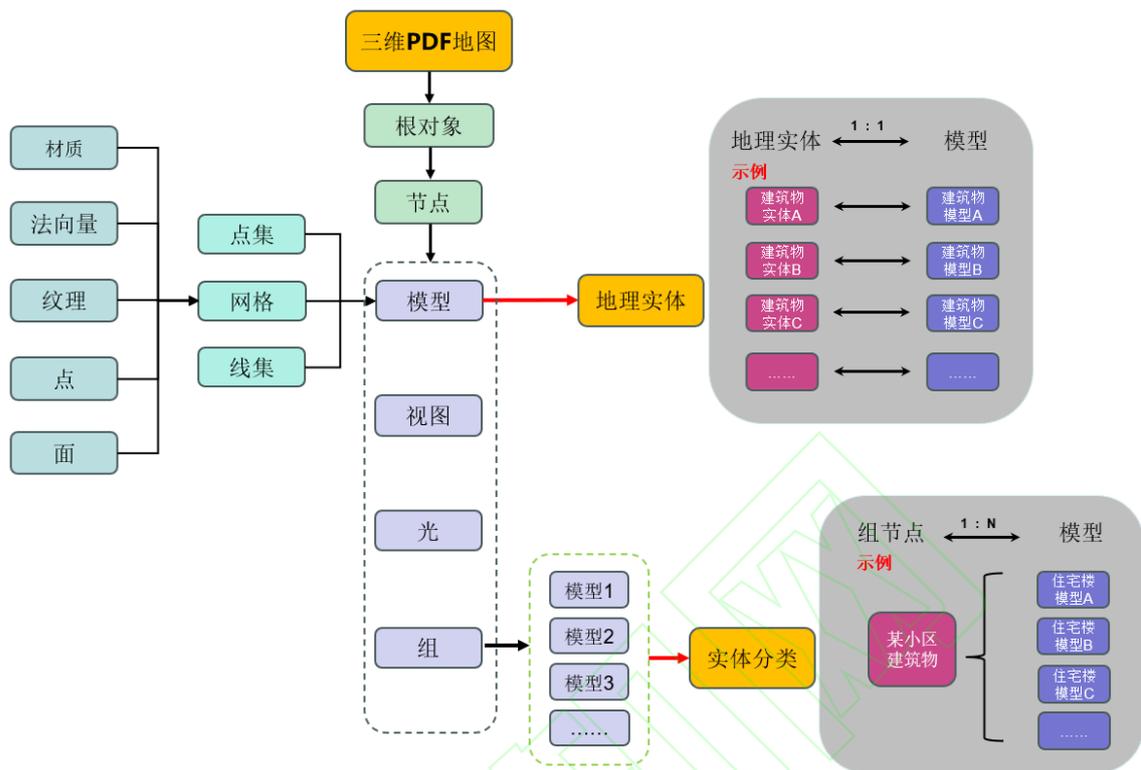


图 4 利用 U3D 数据模型存储三维 PDF 地图内容

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

2 试验与结果分析

2.1 试验数据

本文试验将按照三维 PDF 地图数据组织模型对试验数据进行组织，以制作三维 PDF 地图。试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，这三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，包含 686914 个顶点、1073701 个面及所需纹理材质。

表 1 试验数据

Tab. 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 | 263169 | 524288 | 是 |
| 倾斜摄影数据 | 基于倾斜摄影技术建模 | 244903 | 485382 | 是 |
| 城市三维数据 | 表示城市建筑物等内容 | 686914 | 1073701 | 是 |

2.2 试验过程

遵循三维 PDF 地图数据组织模型，开展三维 PDF 地图制作试验。如图 5 所示，首先，解析获取试验数据中的点、线、面、纹理、材质、法向量与空间参考等数据，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，依次构建 3D Artwork 对象和 Page 对象，再将 U3D 数据编码压缩存储进 3D Stream 中。同时，在 Page 页面对象下构建地图空间参考字典结构，以“Key-Value”的形式存储地理坐标系、基准面、椭球体、投影坐标系、单位等坐标系和投影信息，最终制作完成三维 PDF 地图。

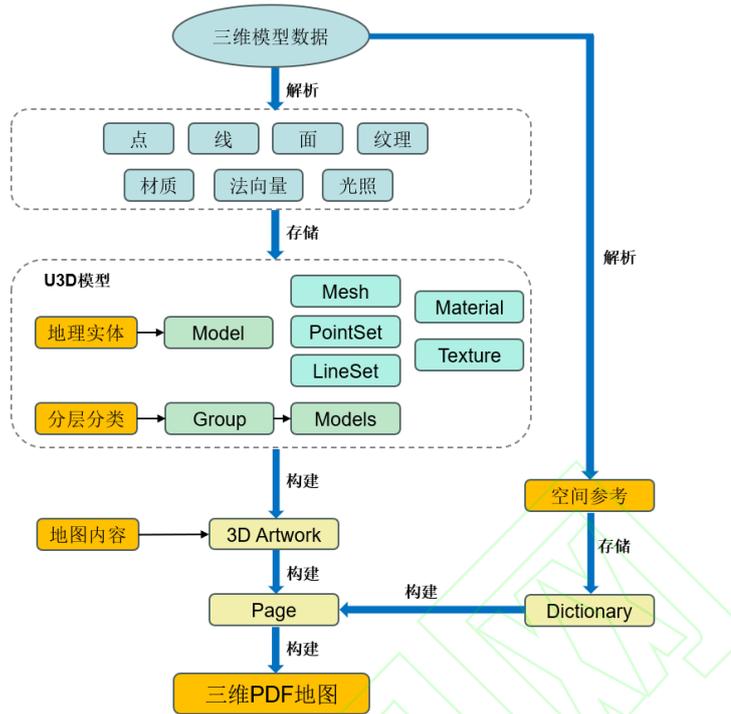


图5 三维 PDF 地图制作原理图

Fig.5 Schematic Diagram of 3D Geospatial PDF Map Production

2.3 试验结果分析

基于三维 PDF 地图数据组织模型将试验数据制作成三维 PDF 地图，试验结果如图 6 所示，使用 PDF 阅读器打开后，完整呈现出原始试验数据的内容，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。试验结果表明，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。

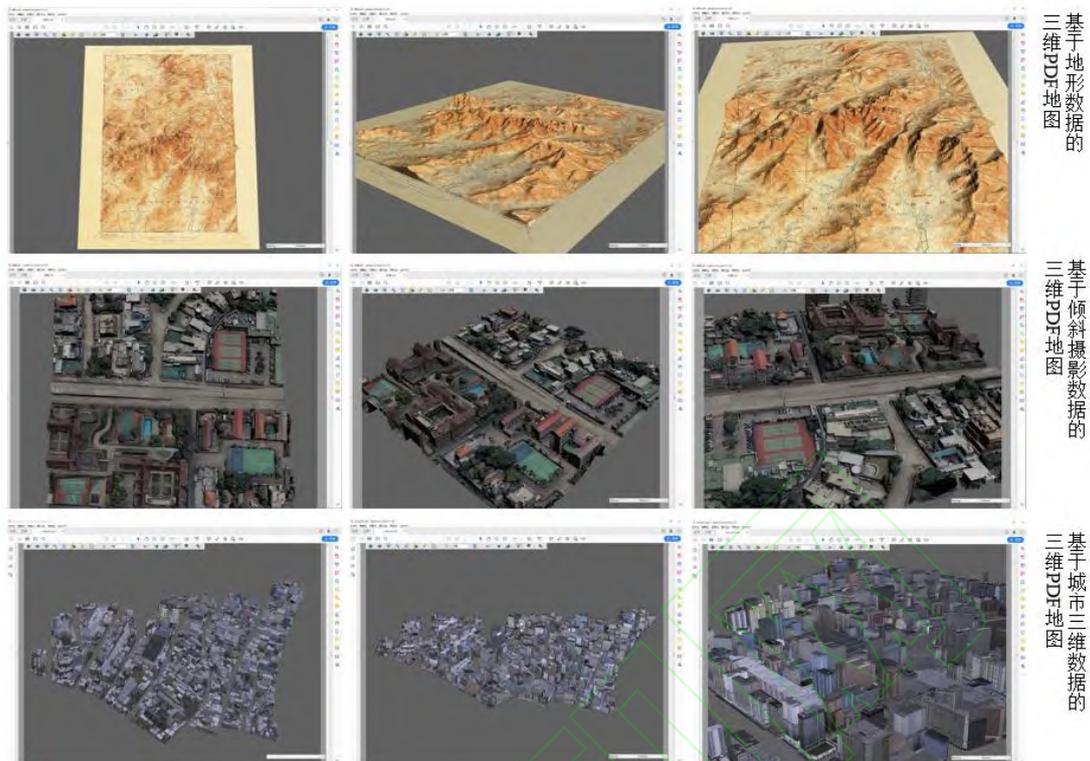


图 6 三维 PDF 地图效果图

Fig.6 3D Geospatial PDF Map Renderings

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三项特征，分别指向地图学理论框架中三项关键内容（符号系统、地图投影和地图综合）^[4]。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。下面分别通过试验对地图基本特征进行验证。

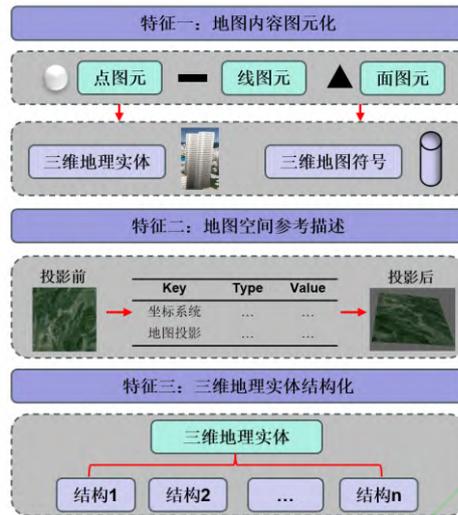


图 7 三维 PDF 地图数据组织模型的两项地图基本特征

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

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 (Point Set)、线集 (Line Set)、格网 (Mesh) 来实现。试验分别利用点集、线集、格网三种结构表示三维 PDF 地图中的点图元、线图元、面图元。试验效果如图 8 所示，图 8 (a) 是基于 U3D 数据结构构建的三维 PDF 地图局部图；图 8 (b) 是利用点集表示点图元的效果图；图 8 (c) 是利用线集表示线图元的效果图；图 8 (d) 是利用格网表示面图元的效果图。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。

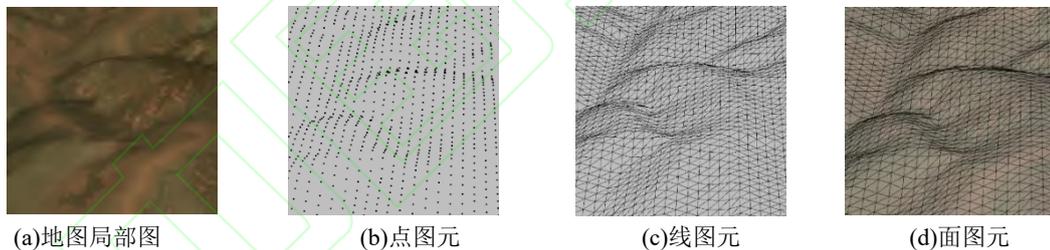


图 8 三维 PDF 地图图元表达效果图

Fig.8 3D Geospatial PDF Map Element Representation Diagram

3.1.2 地图空间参考

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“Key-Value”键值对的方式存储地理坐标系、基准面、椭球体、投影坐标系、单位等坐标系和投影信息。

表 2 地图空间参考字典示例

Tab.2 Map spatial reference dictionary example

| Key | Type | Value |
|--------------|--------|-----------------|
| 地理坐标系 GEOGCS | string | 用于指定一个基于经纬度的坐标系 |
| 基准面 DATUM | string | 用于指定一个水平基准面 |
| 椭球体 SPHEROID | string | 用于指定一个椭球体 |
| 投影坐标系 PROJCS | string | 用于指定一个投影坐标系 |
| 单位 UNIT | string | 用于指定测量使用的单位 |

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。

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，例如仅具备浏览效果、无法为用图者提供地图检索和属性查询等 GIS 功能。三维地理实体结构化有利于增强测绘数据可用性、提高用图人员使用体验。如图 9 所示，以一个房屋模型为例试验说明，该模型由房顶、窗户和墙体组成，使用三个 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三个模型节点进行组合，进而构建三维 PDF 地图房屋实体。

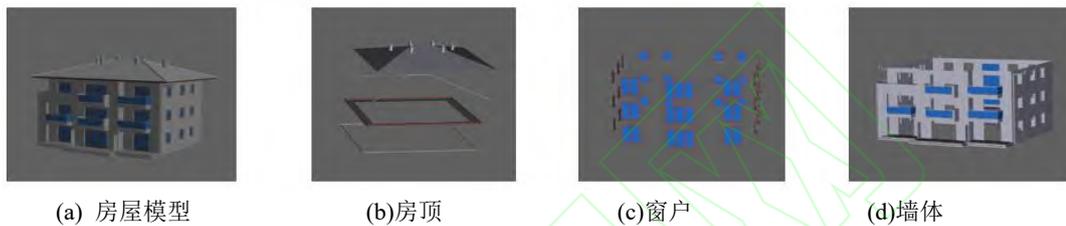


图 9 三维地理实体结构化表示

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三项特征。存储轻量化是指相较于原始试验数据，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 地图以“独立自包含”的 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。下面分别通过试验对三项轻量化特征进行验证。

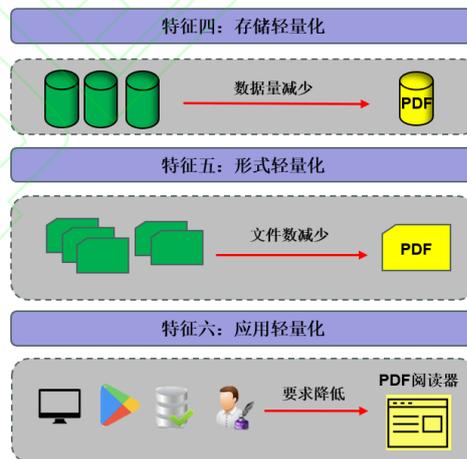


图 10 三维 PDF 地图数据组织模型的三项轻量化特征

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

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%^[35]。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。OBJ 格式是一种通用三维模型格式，支

持复杂几何图形表示，因此本文选择四类 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。结果表明，压缩后四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。试验发现，压缩前后模型几何节点数目相同，数值精度无损失。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。

表 3 三维 PDF 地图压缩率分析

Tab.3 3D geospatial PDF map compression ratio analysis

| 模型 | OBJ 格式 | PDF 格式 | 压缩率 |
|-----------|----------|----------|---------|
| 影像贴图地形模型 | 38649 kB | 14283 kB | 36.955% |
| 无影像贴图地形模型 | 29580 kB | 15691 kB | 53.045% |
| 贴图建筑物模型 | 2567 kB | 1010 kB | 39.345% |
| 实景三维模型 | 36932 kB | 20644 kB | 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。

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、OSGB、3D Tiles 三种数据格式各自的应用特点和定位，OBJ 格式是一种通用三维模型，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，3D Tiles 格式主要用于大规模场景快速加载显示。这三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。三维 PDF 地图数据模型采用隐性分块的方式，基于地图逻辑，利用独立的 PDF 文档格式存储地图内容，有助于提高地图的可用性和可靠性。

表 4 常见的三维数据格式

Tab.4 Common 3D Data Formats

| 三维数据格式 | 文件 | 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 | |
| 3D Tiles | .json | 元数据 | 大规模场景快速加载显示 |
| | .b3dm | 大型异构 3D 模型 | |
| | .i3dm | 3D 模型实例 | |
| | .pnts | 点云数据 | |
| PDF | .cmpt | 组合数据 | 轻量化、快速加载显示 |
| | .pdf | 模型、空间参考、属性 | |

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^[36],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。

4 结语

本文设计了一种三维 PDF 地图数据组织模型,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。试验表明,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、三维地理实体结构化以及存储轻量化、形式轻量化、应用轻量化六项特征。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。需要指出的是,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] WANG Jiayao, CHENG Yi. Discussions on the Attributes of Cartography and the Value of Map[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(3): 237-241 (王家耀, 成毅. 论地图学的属性和地图的价值[J]. *测绘学报*, 2015, 44(3): 237-241)
- [2] MENG Liqiu. The Constancy and Volatility in Cartography[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1637-1644 (孟立秋. 地图学的恒常性和易变性[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1637-1644)
- [3] 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. DOI: 10.13203/j.whugis20230227 (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.DOI:10.13203/j.whugis20230227)
- [4] WANG Xiaolong, YAN Haowen, LI Jingzhong, et al. DDM: A Direction-Distance Model for We-Map Assistance Wayfinding[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. DOI: 10.13203/j.whugis20240072 (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)*. DOI: 10.13203/j.whugis20240072)
- [5] 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 (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)
- [6] GUO Renzhong, YING Shen. The Rejuvenation of Cartography in ICT Era[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1274-1283 (郭仁忠, 应申. 论 ICT 时代的地图学复兴[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1274-1283)
- [7] 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. DOI: 10.13203/j.whugis20220781 (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):20642068.DOI:10.13203/j.whugis20220781)
- [8] 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. DOI: 10.13203/j.whugis20220439 (吴明光, 孙彦杰, 闰国年. 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. DOI: 10.13203/j.whugis20220439)
- [9] 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. DOI: 10.13203/j.whugis20220782 (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. DOI: 10.13203/j.whugis20220782)
- [10] ZHANG Yongjun, ZHANG Zuxun, GONG Jianya. Generalized photogrammetry of spaceborne, airborne and terrestrial multi-source remote sensing datasets[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(1): 1-11 (张永军, 张祖勋, 龚健雅. 天空地多源遥感数据的广义摄影测量学[J]. *测绘学报*, 2021, 50(1): 1-11)
- [11] WU Xincai, WU Liang, WAN Bo. Principles and Methods of Geographical Information Systems, Fourth Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019. 8 (吴信才, 吴亮, 万波. 地理信息系统原理与方法(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.8)
- [12] ZHU Qing, ZHANG Ligu, DING Yulin, et al. From real 3D modeling to digital twin modeling[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(6): 1040-1049 (朱庆, 张利国, 丁雨淋, 等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. *测绘学报*, 2022, 51(6): 1040-1049)
- [13] The State Bureau of Surveying and Mapping. Specifications for the digital products of three-dimensional model on geographic information: CH/T9015-2012. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2021 (国家测绘地理信息局. 三维地理信息模型数据产品规范: CH/T9015-2012[S]. 北京: 测绘出版社, 2021)
- [14] 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): 66-77 (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): 66-77)
- [15] 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. DOI: 10.13203/j.whugis20210574 (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. DOI: 10.13203/j.whugis20210574)
- [16] HUANG Xinran, JIANG Wenping, LIU Yifei, et al. Loading Optimization Strategy of 3D Scene Data in Cesium[J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(S1): 94-98. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2021100 (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. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2021100)
- [17] HUA Yixin, ZHOU Chenghu. Description Frame of Data Model of Multi-granularity Spatio-temporal Object for Pan-spatial Information System[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(9): 1142-1149 (华一新, 周成虎. 面向全空间信息系统的多粒度时空对象数据模型描述框架[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(9): 1142-1149)
- [18] ZHOU Xiaodong, YANG Chuncheng, MENG Nina. A New Digital Map Product—PDF Map[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016, 1, 108-110 (周晓东, 杨春成, 孟妮娜. 一种数字地图新产品——PDF 地图[J]. *测绘通报*, 2016(01): 108-110)
- [19] ZHOU Xiaodong, AI Tinghua, MENG Nina, et al. A PDF Tile Model for Geographic Map Data[J]. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 2019, 8, 373. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi8090373>.

- [20] HU Haojie. Research on Critical Technique of Geo-PDF Map Cartography[D]. Zhenzhou: PLA Information Engineering University, 2011 (胡浩杰. 地理 PDF 地图制图关键技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011)
- [21] LI Heyuan, LI Hongshen, HAN Jiafu, et al. Principle and methods on layout based web map publishing mode with Integrated Map data and High Fidelity[J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(4): 469-476 (李鹤元, 李洪省, 韩嘉福, 等. 图数整合的高保真版式网络地图发布原理及方法[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(4): 469-476)
- [22] 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. DOI: 10.13203/j.whugis20190229 (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. DOI: 10.13203/j.whugis20190229)
- [23] WEN Jianlong, YANG Chuncheng, FU Haojun, et al. The Cross-media Publishing Data Model of Map[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44 (8): 936-942 (汶建龙, 杨春成, 符浩军, 等. 一种地图跨媒介出版数据模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(8): 936-942)
- [24] ZHOU Xiaodong, YANG Chuncheng, MENG Nina, et al. A Electronic Map Data Model Based on PDF[J]. Proceedings of the International Cartographic Association, 2018, 1, 129. DOI: <https://doi.org/10.5194/ica-proc-1-129-2018>.
- [25] Jan P M, Günther S. Increasing Knowledge and Skills for Assembly Processes through Interactive 3D-PDFs[J]. Procedia CIRP, 2016, 48: 454-459.
- [26] Victor A, Lluís C, Eugènia E, et al. Interactive PDF files with embedded 3D designs as support material to study the 32 crystallographic point groups[J]. Computers & Geosciences, 62, 2014, 62: 53-61.
- [27] TerraGO. GeoPDF[EB/OL]. <https://terragatech.com/>.
- [28] ALLORD G J, FISHBURN K A, WALTER J L. Standard for the US Geological Survey Historical Topographic Map Collection[R]. US Geological Survey, 2014.
- [29] CAPUTO R G. The GeoPDF: Creating Maps for Non-Mapper[J]. Engineer, 2010(1): 36-37.
- [30] OGC. PDF Georegistration Encoring best practice[S]. OGC, 2011.
- [31] Adobe Systems Incorporated. U3D Supported Elements[EB/OL]. <http://practicalpdf.com/downloads/FloatingToolbar.pdf>.
- [32] Ecma International. Universal 3D File Format: ECMA-363[S]. Ecma International, 2007.
- [33] Adobe Systems Incorporated. PDF Reference[EB/OL]. <http://www.adobe.com/cn/devnet/pdf/pdfreferencearchive.html>.
- [34] Adobe Systems Incorporated. Adobe Supplement to the iso 32000[EB/OL]. https://www.adobe.com/content/dam/cc1/en/devnet/pdf/pdfs/adobe_supplement_iso32000_1.pdf.
- [35] XU Tao. On Necessity and Feasibility for Research of GeoPDF Products from Basic Surveying and Mapping Activities[J]. Standerdization pof Surveying and mapping, 2014, 30(2): 19-21 (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)
- [36] Foxit Software Incorporated. About Foxit[EB/OL]. <https://www.foxitsoftware.cn/company>.

网络首发:

标题: 三维 PDF 地图数据组织模型研究

作者: 徐立, 杨春成, 刘鹏, 刘铭轩, 陈久栋, 戴纪龙

收稿日期: 2024-09-25

DOI:10.13203/j.whugis20240227

引用格式:

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),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240227 (XU Li, YANG Chuncheng, LIU Peng, et al. Research on 3D Geospatial PDF Map Data Organization Model[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240227)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

高精地图的知识图谱表达

齐如煜, 尹章才, 顾江岩, 陈毅然, 应申

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(4): 651-661.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230308>

利用 POM 和 DLG 数据的矢量地理 PDF 地图快速制作

何列松, 刘海砚, 黄利民, 吴芳华, 魏斌

武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7): 1081-1089.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20190229>