

基于 3D Tiles 的大规模三维地质模型共享技术研究

吴龙华, 侯建光, 朱月霞, 李运杰

(江苏省地质局 地质信息中心, 南京 210007)

摘要: 针对三维地质模型的网络共享与发布研究较少, 基于 3D Tiles 提出了一种大规模三维地质模型共享发布方案: 首先采用基于二次误差测度(QEM)的半边折叠算法, 对模型进行简化, 建立分层 LOD 模型; 再利用平面四叉树+纵向固定距离切分的方法对各级模型进行分块, 建立瓦片分层结构树; 最后计算出所需的几何误差、变换矩阵等参数, 并生成 3D Tiles 瓦片内容及瓦片集描述文件。基于此方案选取了某区域约 1 000 km² 的三维地质体模型进行了实验, 实验表明该方案在保障模型的几何特征和细节表现的同时, 可对大规模三维地质模型进行高效、流畅的加载与显示。

关键词: 3D Tiles; 共享与发布; 三维地质; Cesium

中图分类号: P628

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.14

0 引言

随着数字孪生城市、国土空间规划、三维实景中国等的推进, 迫切需要地上地下一体化的三维空间框架, 准确表达地表、地上、地下各类自然资源空间关系, 为城市管理和治理提供一张图底板, 服务于城市经济社会发展各领域^[1]。3D Tiles 是由 Cesium 团队与开源社区, 在 glTF (GL Transmission Format) 数据结构基础上, 通过扩展加入分层层次细节模型 HLOD (Hierarchical Level of Detail) 概念, 形成的一种用于大规模异构 3D 地理空间数据集流式传输共享、可视化的三维模型数据结构^[2]。配合 Cesium 开源框架, 能够无需插件高效渲染三维地图场景, 同时通过异步请求、多线程处理等策略, 可高效加载海量三维地理空间数据, 已在众多领域都得到非常广泛的应用。

目前, 中外学者基于 Cesium 做了一系列三维应用研究, 主要集中在地上和地表领域^[3]。国外学者对

Cesium 的研究起步稍早^[4], 如: POTNIS 等^[5] 基于 Cesium 框架, 通过可视化的方式, 对地理空间本体及其关系进行了探索研究。HE 等^[6] 针对电力系统主要采用二维电子地图进行管理的局限, 设计提出了一种基于 Cesium 和 3DCityDB 的三维方案, 实现了电力数据在三维环境下的全景展示。国内对 Cesium 的研究主要集中在两方面: 一是对平台功能进行扩展、对数据源进行优化研究。如: 范俊甫等^[4] 基于 Cesium, 在深入研究了平台多源数据空间参考差异及不同瓦片组织规则的前提下, 设计提出了一种支持多源数据的静态与动态瓦片混搭方案。张广波^[7] 研究了基于 Cesium 的数字高程模型和倾斜实景模型数据融合处理的技术方法, 实现了倾斜实景模型与多源空间数据的叠加及动态展示。二是将平台与业务集成, 开展行业应用研究。如: 章旭等^[8] 研究了基于 Cesium 的城市内涝模拟三维可视化方法, 通过研究水文模型探索了城市内涝演化过程及机理, 并基于 Cesium 实现了与三维可视化的结合。窦世卿等^[3] 基于 Cesium 提出了一种基于二维地下管网数据, 通过自动建模并构建

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 江苏省地勘基金项目 (SDK2020001); 江苏省省级财政 (地质找矿) 专项资金项目 (HDYS-DZ005)

第一作者: 吴龙华 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质信息化研究, E-mail: pet-keetty@163.com。

3D Tiles 的方法,实现了地下管网数据的三维可视化
管理。还有一部分学者基于 Cesium 开展了一系列行
业三维可视化研究^[9-10]。

针对三维地质模型的研究,近年来,在计算机图
形学、机器学习等学科领域的发展促进下,极大地推
动了三维地质建模技术的发展,取得了丰富的成果^[11-16]。目前这些研究都主要集中在模型的构建
算法以及空间分析上,对模型的网络共享及发布技术
研究较少,尚未见有学者针对 3D Tiles 开展地下
大规模三维地质模型的共享与发布技术研究。将三
维模型进行网络共享与发布主要存在以下几方面的
难点:①三维地质模型的单体模型通常都比较大,特
别是大范围的地质模型,采用常规的共享发布方式
下载耗时较长,且渲染起来也比较困难;②三维地质
模型的数据结构通常都是基于本地存储设计的,未
考虑网络传输、异步加载等要求,很难直接使用。为
此,基于 3D Tiles 设计提出一种大规模三维地质模
型的共享发布方案,以此实现地上地下一体化三维
空间信息表达显得十分有意义。

1 3D Tiles 数据格式

3D Tiles 已被开放地理空间联盟(OGC)共享,作
为社区标准。它作为一种专为海量异构 3D 地理空间
数据共享、可视化而设计的一种开放数据规范,在继
承了 glTF 高效渲染的同时,通过引入分层次细节模
型的概念,使得很多原本不能在线共享浏览的三维地
理空间数据,如:3D 建筑物(BIM 数据)、点云数据集
和摄影测量模型等都成为了可能^[17]。

3D Tiles 规范的核心包括一个瓦片分层数据结
构和一组存储瓦片内容的图块格式。其中分层数据
结构是按空间数据结构(树)组织的一组瓦片集描
述,由至少一个以 JSON 形式存储的瓦片集描述文
件组成,该文件在记录了瓦片集元数据信息的同时,
以树形结构的方式描述了瓦片对象的空间组织方
式。由于三维场景中的空间对象内容通常是不均匀
的,为了对瓦片集进行有效的组织,分层数据结构可
以是任何具有空间一致性的空间数据结构,包括四
叉树、网格、kd 树和八叉树等。图块格式即瓦片
内容存储格式,以不同类型的方式定义了每个瓦片
内容的数据存储组织方式,3D Tiles 定义了四种瓦
片内容格式:其中 b3dm 即批量三维模型,主要用于
传统三维模型(如 obj)、倾斜摄影数据(如 osgb)、BIM
数据(如 rvt)等;i3dm 即实例三维模型,主要用于具

有明显重复特征可进行多次渲染的数据,如花、草、
树木、路灯等。pnts 即点云数据,主要用于各种激
光雷达采集的大量点云数据;cmpt 即组合数据,由
以上三种不同格式数据中的一种或几种组合到一个
瓦片中,用于复杂的三维空间对象内容表达。根据
四种瓦片内容格式的特点,研究的三维地质模型拟
采用 b3dm 格式。

2 基于 3D Tiles 的三维地质模型构建

三维地质模型构建 3D Tiles 的核心是场景的
分层细节层次构建,为了建立场景的细节层次,需
要采用算法自动对场景中的模型进行分层分块处
理,处理的关键是模型的网格简化与模型分块。基
本思路如图 1 所示:首先,进行模型网格简化,基
于原始的地质模型,采用自底向上的策略,分别对
模型进行简化分层,生成一系列与其形状相同,不
同分辨率的各层次模型;其次,将生成的各个层次
模型,按一定的空间数据组织方式进行分块,形成
各层次模型瓦片块;最后,将上一步生成的分块模
型分别转换成 b3dm 格式,计算出相应的瓦片参数,
包括外包围盒、转换参数、几何误差、空间索引
等,最终形成可供加载渲染的 3D Tiles 瓦片数据
集。

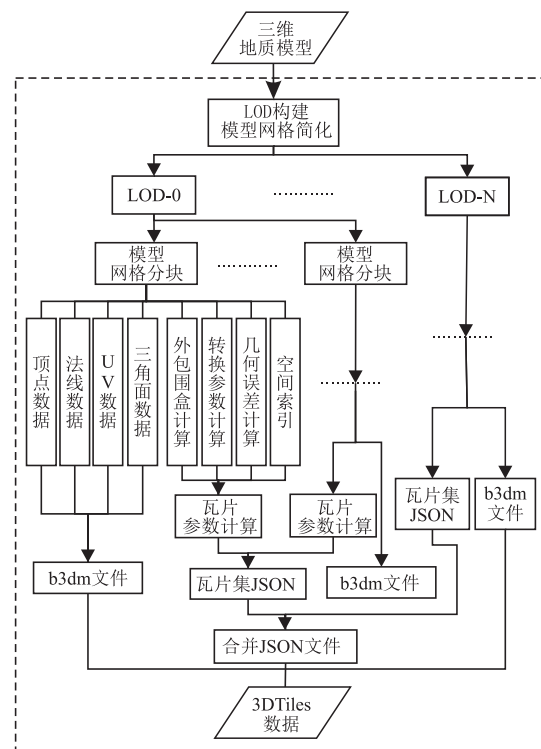


图 1 三维地质模型构建 3D Tiles 流程
Fig. 1 Process of 3D geological model build 3D Tiles

2.1 模型网格简化

模型的网格简化即基于原始输入的网格模型,通过算法对模型进行简化分层,生成一系列与其形状相同、不同精细程度的各层次模型^[18]。针对网格模型的三角形简化,目前的算法大致可以分为三类^[19]:顶点抽取(Vertex Decimation)、顶点聚类(Vertex Clustering)、边折叠(Edge Collapse)。顶点抽取是通过迭代删除顶点及其关联三角形,再通过重新三角化的方式进行模型简化,此方法需要维护模型中三角形的拓扑结构;顶点聚类是通过将模型中的顶点按一定的规则进行聚合,此算法拥有很高的效率和鲁棒性,但其生成网格的质量不是特别令人满意。半边折叠(Half Edge Collapse)是边折叠的一种退化版本^[20],如图2所示,在处理过程中不引入新顶点,内存占用更小、更节省空间资源,同时进行折叠操作时所需处理的三角形数目也更少,在简化过程中效率更高,因此这里采用半边折叠作为三维地质模型的简化算法。

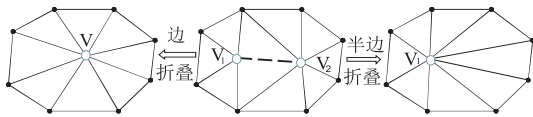


图2 半边折叠与边折叠算法对比
Fig. 2 Comparison of half-edge folding and edge-folding algorithms

通过半边折叠对三维地质模型进行简化的大体流程是:首先,读取模型数据并进行初始化,建立顶点、边、三角形的拓扑关系,然后分别计算出模型中每条边的折叠代价并按由小到大的顺序进行排序,折叠代价的值反映了该边对模型的几何视觉影响程度,值越小则影响越小,因此该值的计算决定了模型优化的质量;然后选取折叠代价最小的边进行折叠操作,通过删除折叠边上的某个顶点以及与其关联的三角形完成半边折叠操作,其中顶点的确定也是影响折叠过程的关键;折叠操作后与折叠边相关的局部拓扑关系都发生了变化,因此需要重建相关局部拓扑信息,并更新相应折叠代价的值及排序;通过重复以上折叠过程直到满足要求即可完成模型的网格简化过程。

以上半边折叠简化过程中,折叠代价的计算和折叠顶点的确定是影响折叠操作的两个关键。其中对于折叠代价的计算,采用 Garland 提出的二次误差测度(Quadratic Error Metrics, QEM)方法^[19],该方法通过计算顶点到与其关联三角形平面距离的平

方和作为折叠代价,可以在支持法向量、颜色、纹理等特征信息的同时兼顾模型简化的效率和质量,计算过程如下:

令模型中每个三角形面 p 的表达式为:

$$ax + by + cz + d = 0$$

其中 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$, 记点 v 的坐标为 $\mathbf{V} = [x, y, z, 1]^T$, 平面 p 为 $\mathbf{P} = [a, b, c, d]^T$, 则点 v 到平面 p 距离的平方为

$$d_p^2(v) = (\mathbf{P}^T \mathbf{V})^2 = \mathbf{V}^T (\mathbf{P} \mathbf{P}^T) \mathbf{V} = \mathbf{V}^T \mathbf{K}_p \mathbf{V} \quad (1)$$

式中:

$$\mathbf{K}_p = \mathbf{P} \mathbf{P}^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix}$$

则顶点 v 到与其所有关联三角面距离的平方和,即顶点 v 的二次误差测度为

$$Q_v = \sum_{p \in \text{plane}(v)} d_p^2(v) = \mathbf{V}^T \sum_{p \in \text{plane}(v)} \mathbf{K}_p \mathbf{V} \quad (2)$$

式中 $\text{plane}(v)$ 为点 v 的三角面集合,对于模型中每条边的折叠代价,通过计算每条边两个端点的二次误差测度之和即可获得。对于折叠顶点的确定,计算相对简单,基于式(2)计算的顶点二次误差测度,比较两个顶点的大小,选择较小的进行折叠。

2.2 模型网格分块

3D Tiles 的分层数据结构可以是任何具有空间一致性的空间数据结构,根据数据类型不同可以自由进行选择,也可将不同的方案进行组合使用。考虑到三维地质模型普遍在平面上分布较广,纵向上较浅的扁平化特征,这里拟采用平面四叉树+纵向固定距离切分的结构进行模型的分块组织。

平面四叉树+纵向固定距离切分的模型分块策略大致思路如下:①首先基于上述模型简化得到的不同层次细节模型,将最顶端分辨率最低的模型切分成若干块。对于模型范围比较大,简化压缩太多会导致模型变形严重时,通过设置合适的简化压缩率,再结合分块,可以在兼顾显示效果的同时提高加载效率,有效提高模型首次渲染的效率;②根据步骤1划分的分块范围,依次对各级别的模型再进行分块,先在平面上将模型分割成 $2^n \times 2^n$ 块(n 代表级别),再在纵向上根据距离进行切分,距离的选择可以根据模型的深度以及复杂度进行综合确定;③最后再将生成的各分层模型块,基于分块策略构建空间索引树,并生成相应的瓦片集 JSON 文件。

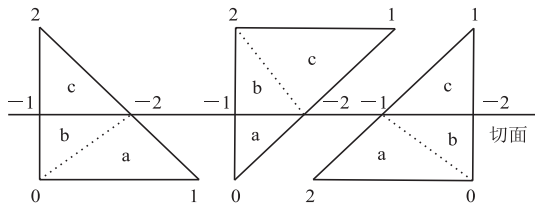


图 3 三角形切割示意图

Fig. 3 Triangle cutting diagram

分块过程中对模型进行切分,本质上就是对模型中所有三角面片进行分割。模型进行分割主要有两种情况:一种是三角形的三个顶点刚好都位于切割面的同侧或正好在切割面上,则不用进行处理,直接纳入相应分块中。另一种是三角形正好被切割面分割,三个顶点分别落在切割面的两侧,则应对三角形进行切割处理。切割处理的过程如图 3 所示,首先判断与切面相交的边,并求取交点生成新的顶点(图中-1,-2点);再根据新生成的顶点,重构相应的三角形拓扑连接信息,形成图中 a、b、c 三个三角形,模型分块后效果如图 4 所示。

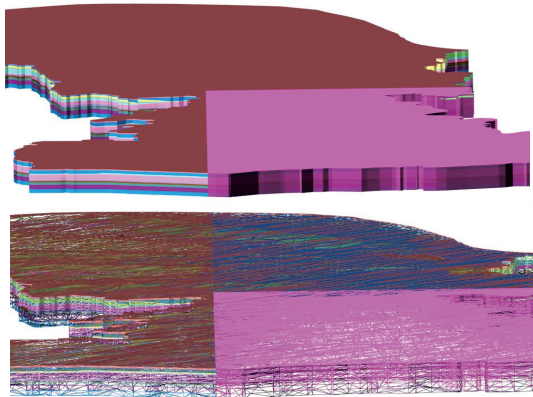


图 4 模型切割后示意图

Fig. 4 Model cutting diagram

2.3 瓦片 b3dm 构建

3D Tiles 瓦片除了可以记录模型本身的渲染数据外,还可记录属性信息。瓦片 b3dm 的数据结构如图 5 所示,由 28 个字节长度的文件头(header)和文件体(body)组成。文件头记录了文件中所存数据的描述信息,包括基本信息如:文件格式 magic(如 b3dm)、版本 version 以及文件大小 byte Length;还有一部分是文件体中要素表(feature Table)和批量表(batch Table)数据的描述信息,包括:要素表和批量表中 JSON 文本字节长度(feature Table JSON Byte Length、batch Table JSON Byte Length),以及要素表和批量表中二进

制数据长度(feature Table Binary ByteLength、batch Table Binary Byte Length)。要素表和批量表是 3d Tiles 中用于记录瓦片相关信息的键值对表,其中要素表记录的是模型个数、中心点坐标等瓦片渲染相关的数据,批量表记录的则是每个模型的属性数据。瓦片渲染所需的图形数据均由二进制 glTF 部分完成,包括顶点、法向量以及材质纹理等。

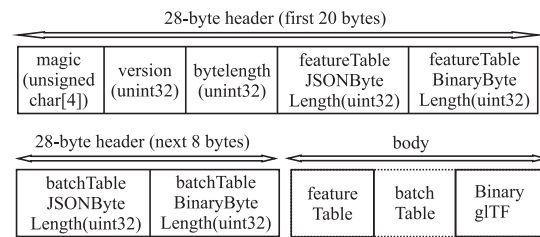


图 5 b3dm 数据格式

Fig. 5 b3dm data format

构建 b3dm 瓦片数据时,文件头部分按上面介绍的内容组织即可,文件体部分要素表和批量表数据可存储为 JSON 二进制文本或二进制,当数据量较小时可直接以 JSON 二进制文本的形式存储,如果数据量较大为了节省存储空间则推荐二进制方式,两者也可同时存在。当以 JSON 二进制文本进行存储时,文件需进行末端对齐,即 JSON 二进制文本内容的最后一个字节相较于整个文件的偏移量必须是 8 的倍数,否则用空格进行补齐。以二进制形式进行存储时则两端都要对齐,即首字节和末字节偏移量都必须是 8 的倍数,如果不满足则用其他字符进行填充。另外,以二进制存储时,每个属性首字节的偏移量必须是其属性 componentType 字节大小的倍数,否则以其他字符进行填充。

2.4 瓦片参数计算

构建瓦片集 JSON 文件描述时,涉及到几个比较重要的属性包括:边界范围框(Bounding Volume)、几何误差(Geometric Error)、旋转变换参数(Transform)、瓦片分层树(Children)。其中边界范围框定义包围瓦片或瓦片内容的空间范围,支持边界框(Box)、边界球(Sphere)和边界区域(Region)三种形式,可以通过模型瓦片顶点数据计算得到,计算比较简单,这里就不作详细介绍,重点介绍其余三个属性。

2.4.1 几何误差

几何误差属性是一个非负数值,用于客户端渲染时动态计算屏幕空间误差(Screen Space Error, SSE),以此判断层次细节的细化程度,决定一个瓦

片在当前视图中是加载本身还是加载它的子瓦片。Cesium 对于 SSE 的计算采用式(3)公式:

$$SSE = 2 * PixeSize = \frac{Geometric\ Error * height}{distance * 2 * \tan(0.5 * fov)} \quad (3)$$

式中 *height* 表示屏幕高度(渲染显示区域的高度)、*distance* 表示视点即相机距离瓦片中心点的距离、*fov* 表示垂直视场角,即可视空间顶面和底面间的夹角。从式中可以看出,当屏幕高度、相机视场角固定时,相同视点位置的瓦片几何误差越大,屏幕空间误差 SSE 越大,意味着加载更加细化瓦片的程度更加迫切。屏幕空间误差(SSE)是判断瓦片是否满足精度要求的依据,因此我们需要通过设置模型的空间误差来控制瓦片的层次细节加载,参数的设置需要在模型的精度和渲染速度上寻求一个最佳的平衡点。通过公式我们也可以看到,当瓦片的中心点刚好位于视锥体的中心位置时,屏幕空间误差(SSE)计算的正好是瓦片外包球的直径在屏幕上的投影大小,因此以瓦片外包球的直径作为瓦片的初始几何误差,后期根据渲染需要进行调整。

2.4.2 变换矩阵参数

3D Tiles 规范提供了一个 4x4 变换矩阵形式的 transform 属性,以支持瓦片局部坐标系,矩阵以数组的形式按列顺序进行存储,每个瓦片可以根据父子节点依次进行变换,也可在根节点下进行统一转换。为了建模方便,目前很多三维地质模型都是在局部坐标系下建立的,需通过 transform 属性进行转换,以实现统一坐标系下展示,计算过程如下:

假设点 C 为瓦片中心点, (B_c, L_c, H_c) 为其大地经纬度坐标, (X_c, Y_c, Z_c) 为对应的笛卡尔坐标。则转换过程可以分解成三步完成:先绕 X 轴旋转 $(\pi/2 - B)$,再绕 Z 轴旋转 $(\pi/2 + L)$,最后再平移 (X_c, Y_c, Z_c) ,最终得到瓦片的转换矩阵 $M = T \cdot R$,如式 4。

$$M = T \cdot R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_c \\ 0 & 1 & 0 & Y_c \\ 0 & 0 & 1 & Z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(L) & -\sin(B)\cos(L) & \cos(B)\cos(L) & 0 \\ \cos(L) & -\sin(B)\sin(L) & \cos(B)\sin(L) & 0 \\ 0 & \cos(B) & \sin(B) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.4.3 分层数据组织

3D Tiles 的分层空间数据结构是以树形结构进行组织的,每个瓦片通过 content 属性定义自身的内容,以 children 数组定义子节点瓦片,以此通过一层层的嵌套实现瓦片集的分层组织。另外,为了提高瓦片集数据的组织效率,每个瓦片的内容 content 属性也可以引用外部的瓦片集内容,即通过 content.uri 属性指向另一个瓦片集 JSON 文件,这样不仅利于瓦片内容的分开管理,同时加载时不用一次性加载所有瓦片信息,有利于提高加载效率。

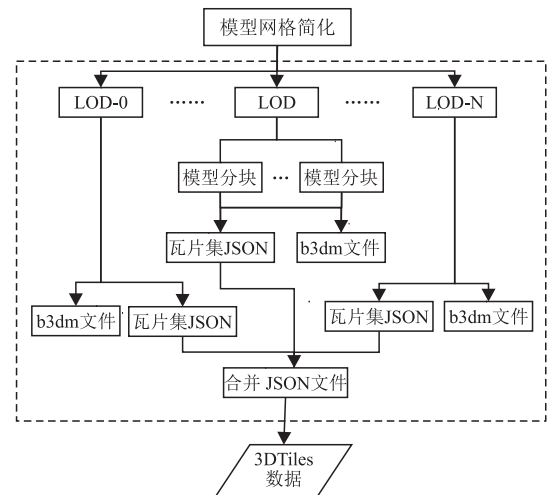


图 6 瓦片空间数据组织结构
Fig. 6 Tile data organization

对于三维地质模型瓦片集的组织,采用如图 6 所示的组织方式,模型中每级不同分辨率的模型块作为一个瓦片集,建立各自不同的分层树结构及瓦片集 JSON 文件,最后再通过引用外部瓦片集的方式合成一个全局瓦片集。外部渲染程序调用时通过全局瓦片集进行预加载,再依据视图范围及分辨率要求动态加载不同的瓦片集内容。

3 实验与结果分析

基于上述 3D Tiles 的生成方法,这里以 C# 作为开发语言、开源 Cesium 作为模型发布后的渲染引擎,并选取了某区域约 1 000 km² 范围内的 5 213 个工程勘察钻孔作为原始数据,对方案进行了实验。

首先将钻孔数据经分层标准化处理后,利用自主研发的 GeoBox 建模工具,基于模型中心点的局部坐标系,采用层面建模的方法建立了该区域三维地质体模型,如图 7 所示(为显示效果,所有模型纵向上都进行了拉伸),建成后的模型大小 246 M,顶

点数 2 830 476 个,三角形数 1 043 492 个,建模过程中因数据组织方便未采用共享顶点方式,因此存在部分顶点数据冗余,最后基于此模型进行如下实验。

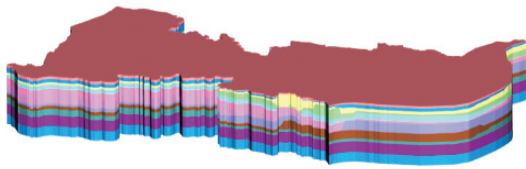


图 7 某区域三维地质体模型

Fig. 7 3D geological model of a certain area

3.1 模型网格简化处理

考虑到此次实验模型的大小,这里对模型进行了 5 级简化处理,建立了 5 级层次细节模型,简化后的模型大小如表 1 所示,每一级采用了大约百分之

二十的压缩率,到最顶级只有 42 MB,三角形数 188 696 个,结合分块策略,基本能满足网络发布及在线渲染要求。

表 1 模型简化后统计信息

Tab. 1 Statistics after model simplification

级别	模型大小/MB	顶点个数/个	三角形个数/个
0 级	42	330 702	188 696
1 级	79	611 264	377 396
2 级	116	917 552	566 096
3 级	188	1 682 985	754 794
4 级	246	2 830 476	1 043 492

模型简化后的效果如图 8 所示,从图中可以看到,每级模型经过简化后都较好地保留了其外部形态与几何特征,细节部分如图 8 各级右半部分局部放大区域,地层变化比较明显的区域特征也保留比较完好,完全满足地层可视化的效果要求。

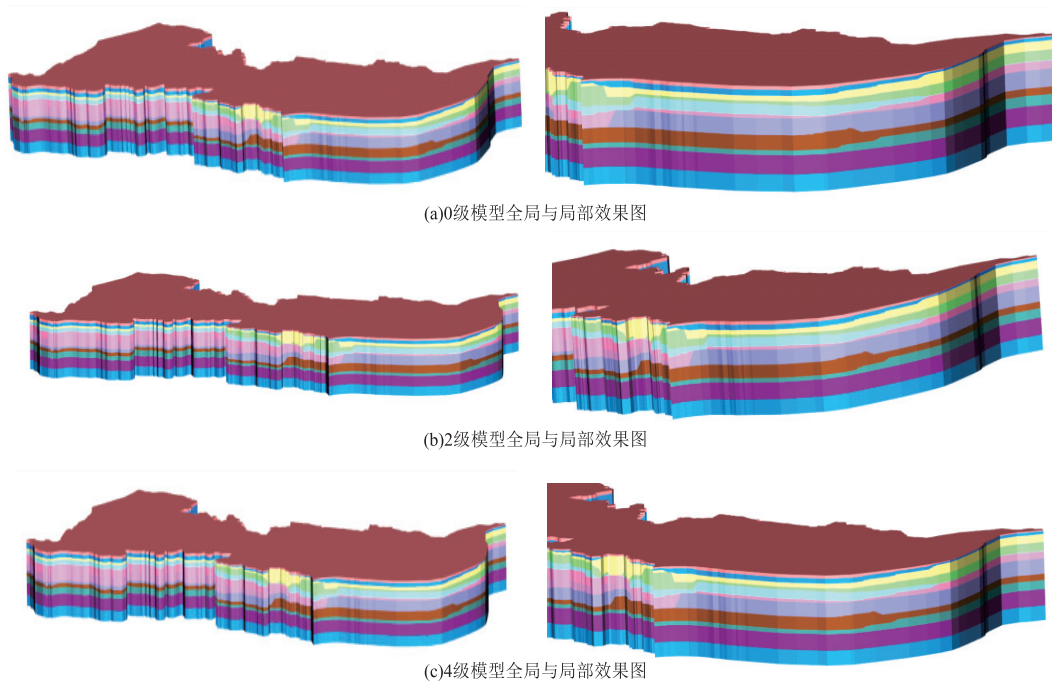


图 8 不同级别模型简化效果图

Fig. 8 Simplified renderings of models at different levels

3.2 模型分块处理

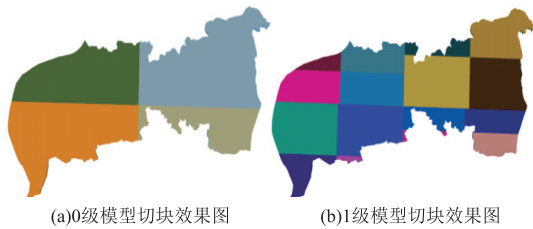
表 2 不同级别模型切块后统计

Tab. 2 Statistics after dicing models at different levels

级别	分块个数	模型总大小/MB
0 级	4	12
1 级	$4 * 4 * 2$	23
2 级	$4 * 16 * 2$	33
3 级	$4 * 64 * 2$	46
4 级	$4 * 256 * 2$	133

本次实验所采用的模型纵向上深 80 m,范围约 1 000 km²,结合模型范围以及大小,将最顶层(0 级)在平面上分割成四块,纵向上不进行切分,其余级别按平面上 $2^n \times 2^n$,纵向上 40 m 间距(即 2 级)进行切分,切分后对应的模型情况见表 2,切分后转换成 b3dm 的过程中对模型进一步进行了 Draco 算法压缩,因此模型大小得到进一步缩减,有效提高了模型发布后的网络传输效率。切分后的效果如图 9

所示,为了便于区分,对每个切块进行了随机色填充。



(a)0级模型切块效果图 (b)1级模型切块效果图

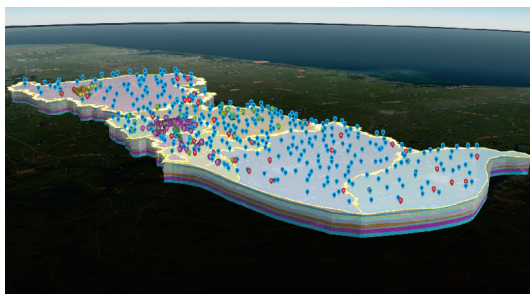
图9 不同级别模型切块效果图

Fig. 9 Diced renderings of model at Different levels

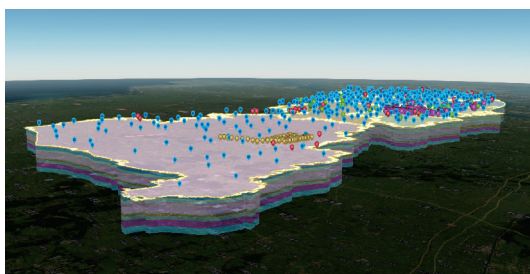
3.3 模型加载与显示

为验证生成后的 3D Tiles 加载效率,这里将生成的 3D Tiles 以及原始未经处理的模型都基于本地的 IIS 进行了发布,并基于开源 Cesium (版本: 1.82)搭建了模型可视化框架。因地质体模型处于地下,为便于浏览,需将虚拟球的地表透明度设置成半透明,同时将 Cesium 默认相机设置成可穿透地表。

经实验,未经处理的模型下载耗时较长且加载后卡顿,无法正常浏览查看。将模型经分级简化、切块等瓦片化处理后,并配合 Cesium 根据视点范围的动态异步加载机制,实现轻松加载显示,效果如图 10 所示,从图中可以看出,模型经过变换矩阵变换后,可与地面无缝贴合,同时结合 3DTiles 的 HLOD 策略,模型渲染的帧率基本稳定在 60 帧左右,可满足模型的快速流畅浏览。



(a)0.3地表透明度效果图



(b)0.7地表透明度效果图

图10 不同透明度下的模型加载效果图

Fig. 10 Model loading renderings with different transparency

4 总结

笔者基于 3D Tiles 设计提出了一种大规模三维地质模型的发布共享方案,方案首先采用半边折叠的方法对模型进行几何简化,并通过二次误差测度(QEM)方法来控制折叠边的选择与折叠顶点的确定,在保证简化效率的前提下保障了模型的简化质量,生成了多层次细节模型。简化完成后,利用平面二叉树+纵向固定距离切分的方法对各级模型进行了分块,介绍了分块原理,并生成了瓦片集空间数据结构树。同时对构建 3D Tiles 过程中的各种瓦片参数进行了分析,详细阐述了计算过程及注意事项。最后基于某区域约 1 000 km² 的三维地质模型数据进行了实验,实验结果表明,结合开源 Cesium 框架,本方案在保障模型的几何特征和细节表现的同时,可进行高效、流畅的加载与显示,对大规模三维地质模型的共享与可视化研究具有重要的借鉴和指导意义。另外,实验所建立的三维地质模型未采用共享顶点的数据组织方式,后续改为共享顶点结构后将有助于进一步提高性能。

参考文献:

- [1] 自然资源部办公厅. 自然资源三维立体时空数据库建设总体方案[R]. (2021-02-08).
General Office of the Ministry of Natural Resources. Overall plan for the construction of three-dimensional spatial-temporal database of natural resources [R]. (2021-02-08). (In Chinese)
- [2] 曹浩泽. 3D Tiles 定义解析与生产规范设计: 以三维建筑物瓦片为例[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
CAO H Z. Analysis for 3D tiles definition and design for production stangard[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (In Chinese)
- [3] 窦世卿, 梁富翔, 徐勇, 等. 基于 Cesium 的地下三维管网 3D Tiles 模型构建与可视化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7439-7446.
DOU S Q, LIANG F X, XU Y, et al. The 3D tiles model building and visualization technology Of underground pipe network based on cesium [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7439-7446. (In Chinese)
- [4] 范俊甫, 胡桃英, 何惠馨, 等. Cesium 框架多源电子地图瓦片数据混搭方案设计[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 695-705.
FAN J F, HU T Y, HE H X, et al. Multi-source dig-

- ital map tile data mashup scheme design based on Cesium[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(4): 695-705 (In Chinese)
- [5] POTNIS A V, DURBHA S S. Exploring visualization of geospatial ontologies using cesium[C]//Second International Workshop on Visualization and Interaction for Ontologies and Linked Data Co-Located with the 15th International Semantic Web Conference, Tokyo: ISWC, 2016: 143-150.
- [6] HE B, MO W X, HU J X, et al. Development of power grid Web3D GIS based on cesium[C]//IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference 2016. Xi'an: IEEE, 2016: 2465-2469.
- [7] 张广波. 面向倾斜实景模型的三维可视化平台建设技术研究[J]. *测绘通报*, 2021(S1): 277-281.
ZHANG G B. Research on construction technology of 3D visualization platform oriented to oblique real scene model[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(S1): 277-281. (In Chinese)
- [8] 章旭, 沈婕, 周卫, 等. 基于 Cesium 的城市内涝模拟三维可视化方法[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2020, 20(3): 65-70.
ZHANG X, SHEN J, ZHOU W, et al. Study on urban waterlogging simulation and visualization method based on cesium[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 20(3): 65-70. (In Chinese)
- [9] 陈继培, 吴剑, 高坤. 基于 Cesium 的三维地质公园导览系统研发[J]. *地理空间信息*, 2022, 20(1): 142-144.
CHEN J P, WU J, GAO K. Development of 3Dgeopark navigation system based on Cesium[J]. *Geospatial Information*, 2022, 20(1): 142-144. (In Chinese)
- [10] 王金娜, 焦学军, 宋会传, 等. 基于 CESIUM 的露天矿山实景三维智能监管技术研究[J]. *地理空间信息*, 2021, 19(8): 93-96.
WANG J N, JIAO X J, SONG H C, et al. Research on real scene 3D intelligent supervision technology of open-pit mine based on CESIUM[J]. *Geospatial Information*, 2021, 19(8): 93-96. (In Chinese)
- [11] 郭福生, 吴志春, 李祥, 等. 江西相山火山盆地三维地质建模的实践与思考[J]. *地质通报*, 2018, 37(2/3): 421-434.
GUO F S, WU Z C, LI X, et al. The 3D geological modeling of Xiangshan volcanic basin in Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(2/3): 421-434. (In Chinese)
- [12] 罗开云, 隆振海, 何永清, 等. 非拓扑一致性三维地质块体建模算法研究[J]. *物探化探计算技术*, 2019, 41(5): 690-696.
LUO K Y, LONG Z H, HE Y Q, et al. 3D geological modeling algorithm which is fully independent of the topology of intersection curves of the model[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 41(5): 690-696. (In Chinese)
- [13] 薛林福, 李文庆, 张伟, 等. 分块区域三维地质建模方法[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(6): 2051-2058.
XUE L F, LI W Q, ZHANG W, et al. A method of block-divided 3D geologic modeling in regional scale[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(6): 2051-2058. (In Chinese)
- [14] 何畏, 吴文鹂. 基于截面轮廓线人机交互三维地质体建模[J]. *物探化探计算技术*, 2010, 32(4): 433-436.
HE W, WU W P. Human-computer interaction 3D geological body modeling based on cross-section contour line[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(4): 433-436. (In Chinese)
- [15] 郭甲腾, 代欣位, 刘善军, 等. 一种三维地质体模型的隐式剖切方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2021, 46(11): 1766-1773.
GUO J T, DAI X W, LIU S J, et al. An Implicit Cutting Method for 3D Geological Body Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1766-1773. (In Chinese)
- [16] 万波, 尹芮芮, 左泽均, 等. 一种基于三角网的地质体三维模型切割方法[J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1966-1976.
WAN B, YIN R R, ZUO Z J, et al. 3D Geological Model Intersection Algorithm Based on Triangular Mesh[J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1966-1976. (In Chinese)
- [17] 孙成鹏. 基于 WebGIS 的三维地质体可视化及其应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
SUN C P. Visualization and application of Three-Dimensional geological body based on WebGIS [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019. (In Chinese)
- [18] 李新维, 邓非, 李学飞, 等. 一种大规模倾斜摄影模型三维可视化方案[J]. *测绘通报*, 2017(4): 39-43.
LI X W, DENG F, LI X F, et al. A visualization plan for large-scale 3D models with oblique photogrammetry technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(4): 39-43. (In Chinese)
- [19] GARLAND M, HECKBERT P S. Surface simplification using quadric error metrics[C]//Proceedings of

the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. [S. l.]: ACM Press/ Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 209-216.
[20] 卢威, 曾定浩, 潘金贵. 支持外观属性保持的三维网格

模型简化[J]. 软件学报, 2009, 20(3): 713-723.
LU W, ZENG D H, PAN J G. Mesh simplification for 3D models with feature-preserving[J]. Journal of Software, 2009, 20(3): 713-723. (In Chinese)

Research on large-scale 3D geological model sharing technology based on 3D Tiles

WU Longhua, HOU Jianguang, ZHU Yuexia, LI Yunjie

(Jiangsu Geological Bureau, Nanjing 210007, China)

Abstract: With the lack of research on network sharing and publishing of 3D geological models, a large-scale 3D geological model sharing and publishing scheme is proposed based on 3D Tiles: First, the half-edge folding algorithm based on the quadratic error measure (QEM) is used to simplify the model and establish a hierarchical LOD model; Then use the method of quadtree with vertical fixed distance segmentation to divide models at all levels, and establish a tile hierarchical structure tree; Finally the required geometric error, transformation matrix and other parameters are calculated, and the 3D Tiles tile content and tile set description file are generated. Based on this scheme, a 3D geological body model of about 1,000 square kilometers in a certain area was selected for experiments. Experiments show that this scheme can efficiently and smoothly display large-scale 3D geological models while ensuring the geometric features and details of the model.

Keywords: 3D Tiles; share and publish; 3D geology; Cesium