城市信息模型中植被模型的细节层级构建

——以 CityGML 为例

张 炜 李 欣 徐 霞 李文娇

华中农业大学园艺林学学院 武汉 430070

摘要：为构建适用于城市植被三维数字化模拟的数据结构，促进城市绿地监测和管理的数字化发展，针对不同细节层级下植被模型的应用需求，以 CityGML 标准为例，参考 CityGML 3.0 标准中建筑模型的细节层级特点，提出对应的植被模型 LOD 0~3 细节层级定义，将不同细节层级的植被模型标准化为 2D 图形（LOD0）、符号化 3D 几何体（LOD1）、简单 3D 几何体（LOD2）和精细 3D 几何体（LOD3）4 种类型，并提出不同层级对应的几何模型、构件分类和属性指标的数据逻辑，以及基于时间序列的植被模型表达方式。最后，以武汉江滩公园阳光草坪植物群落为例，构建 LOD 0-3 的 CityGML 植被模型，并对模型的适用性和应用前景进行探讨。结果表明，研究构建的转换流程可从 GIS 数据或 SketchUp 模型生成不同细节层级的 CityGML 植被模型，实现模型几何特征与属性信息的融合表达；通过 CityGML 标准构建多细节层级的植被模型，可与现有城市信息模型构建标准进行衔接，实现几何语义一体化的植被模型信息表达，促进城市绿地三维空间特征的数字化和信息化。

关键词：CityGML；细节层级；城市信息模型；城市绿地；语义建模

DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.19.0003

Level-of-detail Construction for Vegetation Model in City Information Modeling: A Case Study of CityGML

Zhang Wei Li Xin Xu Xia Li Wenjiao

(College of Horticulture Forestry Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: To establish a data structure suitable for three-dimensional digital simulation of urban vegetation and to advance the digitalized development of urban green space monitoring and management, this study explores the application needs of vegetation models at different levels of detail (LOD). The CityGML standard is taken as an example and the LOD characteristics of building models in CityGML 3.0 are referenced to propose the definition of LOD for the corresponding vegetation model LOD 0-3. Vegetation modeling at different LODs is standardized into four types: 2D graphics (LOD0), symbolized 3D geometry (LOD1), simplified 3D geometry (LOD2), and detailed 3D geometry (LOD3). The data logic for corresponding geometric models, component classifications, and attribute metrics across levels is outlined, along with a time-series-based expression method for vegetation models. At the end, the plant communities of the Sunshine Lawn in Wuhan Riverside Park are used as a case study to construct a CityGML vegetation model spanning LOD 0-3. The applicability of this model is explored, and corresponding application prospects are proposed. The developed conversion workflow enables generation of CityGML vegetation models at varying LODs from GIS data or SketchUp models, achieving integrated expression of geometric features and attribute information. Multi-LOD vegetation models constructed via CityGML standards

收稿日期：2024-06-19

* 基金项目：华中农业大学自主科技创新基金项目（2662025PY027）

第一作者：张炜（1988- ），男，博士，副教授，研究方向为数字风景园林和参数化设计。E-mail：zhang28163@mail.hzau.edu.cn

facilitates alignment with existing urban information modeling frameworks, enabling unified geometric-semantic expression of vegetation model data. This approach advances the digitization and informatization of three-dimensional spatial characteristics in urban green spaces.

Keywords: CityGML; level of detail; city information modeling; urban green space; semantic modeling

在智慧城市和国土空间信息平台的建设趋势下，城市信息模型（City Information Modelling，CIM）建设的理论与实践研究已成为当前热点。2020 年，住建部发布《城市信息模型（CIM）基础平台技术导则》，对城市各类信息模型的构成和表达方式进行说明，规划到 2035 年，建立全国统一的国土空间信息平台，以期全面提升国土空间治理体系和治理能力现代化水平[1]。三维城市信息模型越来越多地应用在城市规划和分析等多个领域。

植被模型作为城市信息模型的组成部分，在城市环境、气候环境影响分析及生态系统服务评估等方面具有重要作用。当前植被三维模型通常基于三角格网或多边形格网构建，多用于视觉展示。随着各类三维模型转向几何特征和语义信息结合发展[2-3]，创建适用于植物的空间模型构建方式，已成为实现绿地空间数字化的必要途径。

目前国际上与城市信息模型（CIM）和建筑信息模型（BIM）相关的主要标准有 IFC 标准、SOSI5.0、I3S、CityGML 等。由于相关技术平台碎片化，绿地规划设计和管理评估缺乏统一模型框架，城市绿地现有相关标准和定义尚不完整。

CityGML 是开放地理空间信息联盟（Open Geospatial Consortium，OGC）2008 年提出的基于城市 3D 对象的通用语义信息模型，用于城市信息模型的表达、存储和交换的开源三维模型标准文件格式。CityGML 3.0 标准发布于 2021 年 9 月，在原 CityGML 2.0 标准基础上进行了修改和补充[4]。本研究以 CityGML 标准为例，对不同细节层级下植被模型的构建需求和方法进行探讨。

1 城市信息模型的组成和构建方法

1.1 数据结构

CityGML 基于统一建模语言（Unified Modeling Language，UML）描述不同城市对象的构建方式，定义了城市场景中常见的如建筑物、道路、河流、桥梁等三维要素的几何特征和属性，以及各要素之间的层级关联[5-7]。CityGML 3.0 包含外观、建筑、城市家具等 11 个主题模块，以及外观、点云、泛型、版本控制和动态功能 5 个扩展模块。CityGML 模型的几何形状通过 ISO 19107 中几何定义的子集实现[8]。由于城市建模需求的复杂性，往往存在 CityGML 未涵盖的 3D 对象或未定义的属性类型。CityGML 支持 3 种功能扩展方式对未定义对象和属性进行扩展，包括通用对象和属性扩展、应用领域扩展和代码列表扩展[7]。

1.2 应用现状

作为城市信息模型的开放标准，CityGML 已在 2008 年成为 OGC 标准，并在多个国家和地区获得广泛使用。柏林、伊斯坦布尔、维也纳等城市已将 CityGML 作为城市信息模型的标准格式[9-11]。欧洲各国首都均提供 CityGML 格式模型，德国大部分城市提供 LOD2 层级的 CityGML 模型[12]。围绕 CityGML 也开展了一系列的相关研究，如 Falkowski 等[9]基于 CityGML 模型，建立了建筑物的半自动建模流程，张文元等[3]基于 CityGML 标准，建立了中国古建筑的三维语义模型。Gobeawan 等[13]基于 CityGML 2.0 构建了 LOD1-3 的植被模型标准，并建立了 LOD2 样地模型。在 CityGML3.0 方面，Beil 等[14]基于 City GML 3.0 讨论了街道模型的建模方法，以及街道空间的交通模拟和太阳辐射研究。Nega 等[15]使用 CityGML3.0 建筑模块，建立了城市三维地籍管理系统。

1.3 构建方法

除直接对 GML 文件进行手工编码外，部分建模和转换工具可以简化 CityGML 模型的构建和转换。现有转换工具基于 CityGML 2.0 已经比较成熟和完善，但对 CityGML 3.0 的支持尚比较有限。在 CityGML 3.0 模型的构建和生成方面，Kutzner 和 Thomas[16]基于 FME 构建了 IFC 模型至 CityGML 模型的转换流程。Son 和 Thomas[17]基于 Java 建立了将 CityGML 2.0 转换为 CityGML 3.0 的转换工具。

1.4 数据交换和可视化

基于开放标准的 CityGML 在城市信息模型构建中受到广泛的支持，也被广泛应用于 BIM 和

GIS 的数据交换和集成。CityGML 可以实现与 BIM 开放标准 IFC 之间的映射。常见 BIM 与 GIS 平台，如 Infraworks、ArcGIS、QGIS 等，均提供对 CityGML 图形显示和格式转换的支持[18-19]。CityGML 常用的数据可视化格式包括 KML、COLLADA 和 glTF，可用于 Cesium、Google Earth 等平台。3D City DB 提供了 CityGML 管理和可视化平台，广泛用于项目研究和数据生产[20]。

2　不同细节层级植被模型构建需求

2.1　细节层级的原理和类型

细节层级（Levels of Detail，LOD）是计算机图形学的一项概念，依据用户需求和计算性能需要，对现实物体的抽象级别进行定义，实现对模型细节信息的优化表达。在建筑信息模型（BIM）中，LOD 代表不同设计阶段的建模标准。LOD 概念在设计行业由美国建筑师协会（AIA）于 2008 年首次提出，通过定义 5 个不同的 LOD 来定义 BIM 模型中的细节层级[21]。

在当前城市和建筑信息模型相关标准中，不同数字信息模型标准对细节层级定义存在一定差异，通常划定为 4~5 个细节层级，以实现不同尺度下几何特征和语义信息的表达。例如，IFC 标准将建筑信息模型细节层级划分为 LOD 100，200，300，350，400，500 共 7 个细节层级[22]；CityGML3.0 标准中对城市模型构件定义了 LOD 0~3 共 4 个细节层级[23]。不同标准的相似细节层级的模型信息可以通过数据转换工具，如 FME 等进行转换[24]。

CityGML 3.0 包含 LOD 0~3 共 4 个细节层级（表 1），各细节层级均包含对建筑内外空间环境的支持。CityGML 3.0 中 LOD 不与城市对象的分解程度相关联，仅代表空间表示[4]。

表 1　CityGML 3.0 对细节层级定义

细节层级	模型特征
LOD0	高度泛化模型
LOD1	体块模型或拉伸几何体
LOD2	简化的真实模型
LOD3	高度详细的模型

2.2　不同细节层级植被模型的构建需求

植被空间形态与属性特征同人工设施存在较大差异（图 1）。现有城市信息模型在植被的特征表达方面通常并不完整。CityGML 将植被模型分为独植对象（SolitaryVegetationObject，SVO）和群植对象（PlantCover，PC）两种类型，同属于城市对象（CityObjects），其中独植对象的属性包括树高、树干直径、树冠直径、植被类别和物种 5 个方面；群植对象使用平均树高属性表达植被特征，包含森林和草地两种类型[25]。在植被属性方面，CityGML 仅包含植物分类、功能、物种、树高、树冠形态、胸径等基本属性信息，缺失植物生理特征指标，不能全面反映植物的生物学特征[13]。

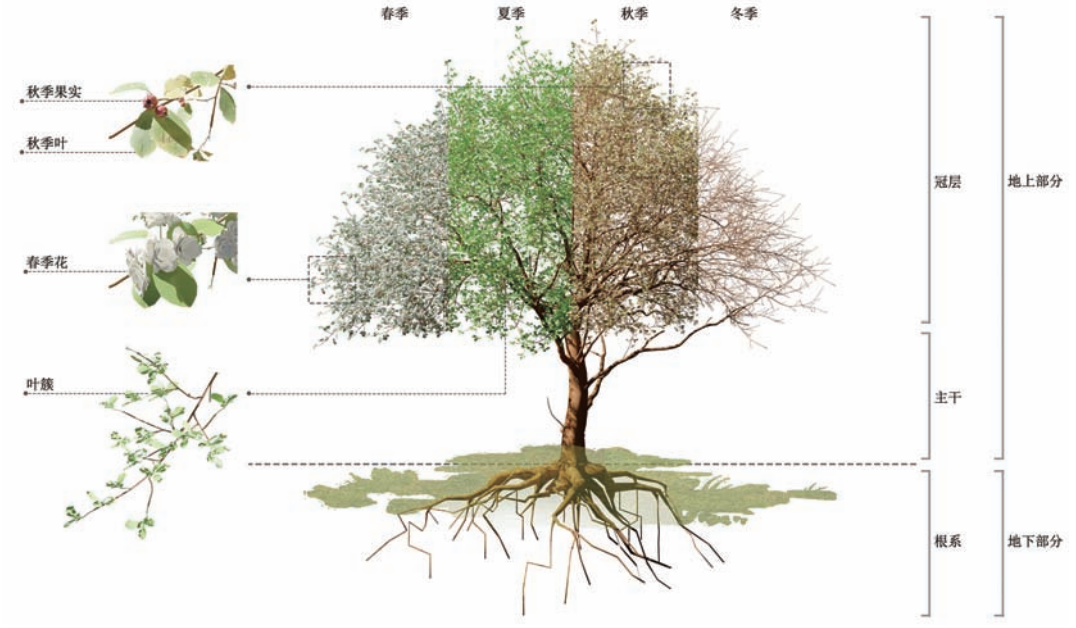


图 1　植被模型的抽象化表达

不同细节层级对应不同的模型可视化和分析需求。低细节层级模型（LOD0～1）可用于区域尺度下的宏观分析，中细节层级模型（LOD1～2）用于城市和街区尺度下植被信息的模拟和表达，高细节层级模型（LOD3）用于项目尺度高精度数字孪生模型的构建（表 2～3）。

表 2 不同细节层级植被模型的构建原则

细节层级	构建原则
LOD0	基于平面二维矢量图形要素植被信息的最简化表达
LOD1	基于单一或有限枚举类型的植被简单形态表达,可以通过树冠形态区分不同树种类型,相同树种使用相同模型表达
LOD2	基于参数化简单几何多面体形态的植被模型表达,可以反映植物的空间形态特征,相同树种的不同个体可使用不同模型进行表达
LOD3	基于参数化复杂几何体植被信息模型表达,反映植物的分枝,叶片,以及花和果实的几何特征和语义信息

表 3 不同细节层级植被模型的应用需求

细节层级	几何特征	语义信息	应用需求
LOD0	基于二维地理空间数据，使用属性附加值表达绿地信息	各类平面指标，如植被 NDVI，LAI 等各类植被指数，权属信息等	可用于区域尺度下植被特征的分析和表达，如景观格局分析，绿地生态过程的模拟和评估等
LOD1	基于体块化符号表达植被特征，同种树种采用相同造型，表达不同植株间的几何特征与属性差异	通过株高，冠幅等指标实现不同植株的简单差异化，反映植株整体生态特征指标	用于简单三维场景下植被的体块化表达和可视化分析，用于区域三维绿量建模与三维景观格局的快速评估
LOD2	通过树冠、主干和根系的构件区分，可用于城市复杂三维场景下植被的可视化和分析	通过构件的空间形态和属性特征，可以在三维空间反映植物的生理特征和生态过程	可反映不同类型树木在不同环境下的生长特点差异，为植物生态系统服务评估和植被微气候环境模拟提供依据，用于计算地上地下生物量，以及植被初级生产力评估等
LOD3	将植被叶簇和枝干构件化，表达植物的详分枝结构和生长特征，实现精细植被模型构建。	基于植物叶簇生态指标和空间分布，可用于叶面积密度，空间生物量分布，枝干力学特性等生态指标模拟	用于植物环境气候模拟和生态系统服务分析，如结合 CityGML EnergyADE 扩展分析环境能耗；基于枝干强度和叶片密度，模拟风环境与植物的交互影响；基于叶簇属性指标评估植物固碳释氧，蒸腾作用和气候调节作用

在现有绿地不同的数据模型中，各类细节层级均存在一定的应用基础。例如，现有林业图斑数据和土地利用数据通常仅包含平面几何信息和属性数据，可归结为 LOD0 层级；现有城市三维信息模型中树木单体通常基于整体符号化表示以及树种、冠幅、冠高等属性信息，不包含植物的构件信息，在原理上属于 LOD1 层级；LOD2 层级可以表达物体的简单形态，在能耗分析方面应用广泛，现有 BIM 软件中的植被模型（如 Revit、Vectorworks 等），以及三维环境微气候分析和模拟工具（如 ENVI-met 4 等），包含植物的几何体积外观，其模型数据属于 LOD2 层级；现有植物生长和环境交互模型（如 ENVI-met 5 中的乔木模型）使用 L-system 算法生成的枝干和叶片数据模型，总体属于 LOD3 层级。这些不同层级的数据模型，可统一转换为支持细节层级表达的城市信息模型（如 I3S、CityGML 等数据类型），通过标准化流程进行数据的集中存储和管理。

3 不同细节层级植被模型的构建方式

3.1 几何特征

城市信息模型中对象的几何模型通常使用 Mesh 三角面模型进行表达。模型对象通常为语义模型，侧重于属性和关联逻辑，而并非基于可视化渲染，因此模型通常并不追求逼真的显示效果，而是使用抽象和简化的形态表示。

CityGML 模型细节层级由几何复杂性、维度、外观、空间语义一致性和属性 6 个方面进行定义[26]。各细节层级植被模型可抽象为地上和地下两个部分，基于几何复杂性、维度、外观 3 项特征使用 LOD0～LOD3 共 4 个层级。由于植被结构的复杂性，在高细节层级下植被三角面模型数量会显著增加，因此植被几何模型需进行简化表达以提升显示性能（表 4）。

表 4　不同细节层级 CityGML 植被模型的几何特征

细节层级	空间维度	植被模型		植被模型精细程度	可视化特征
		地上部分	地下部分		
LOD0	2D			平面模型	表达植物的平面形态
LOD1	3D			简单三维多面几何体	基于简单三角面体块模型，表达植物的冠幅、冠高、根系范围和根深信息
LOD2	3D			复杂三维多面几何体	基于复杂三角面模型表达树种和形态之间的差异
LOD3	3D			三维构件几何体	基于构件几何体表达植物的详细外观特征

3.2　构件划分

CityGML 3.0 将抽象植被对象（Abstract Vegetation Object）划分为单独植被对象（SolitaryVegetationObject）和植被群组（PlantCover）两种类型，并未对植物内部组成特征进行构件化定义。植物内部对象生理生态特征存在显著差异，在植物生态环境效益模拟和评估中，其内部组成需要进一步区分和明确。

植物叶片和枝干具有显著的功能差异。LOD0 和 LOD1 模型为整体模型，可对植物地上部分（TreeShootSystem）和地下部分（TreeRootSystem）进行区分。在 LOD2 和 LOD3 中将地上和地下部分分离进行构件化处理。为简化模型，LOD2 模型将冠层整体作为树冠（TreeCrown）构件，将主干和分枝统一作为枝干（TreeBranches）构件；LOD3 模型基于植物的自相似性，将冠层进一步细分为多个相同叶簇构件（TreeTwigs），代表植物枝干分枝点的成簇枝叶，作为附着于植物分枝构件的重复单元。植物叶簇模型可包含叶片、芽、花、果实等不同组成部分，实现对植物复杂几何特征的表达（表 5）。

表 5　不同细节层级的植被构件类型

构件名称	构件特点	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3
植物地上部分	植物地上部分构成的几何体				
树冠	植物冠层空间形成的几何体	—	—		
枝干	植物枝干形成的空间骨架	—	—		
叶簇	植物枝干分枝点的叶簇单元	—	—	—	
植物地下部分	植物地下根系的几何体				

LOD0 和 LOD1 层级模型为标准几何体，构建相对简单，可以通过遥感影像提取树冠形态用于模型构建[27-28]。LOD2 和 LOD3 反映植物间的差异化形态，需要通过相应的算法流程实现。在 LOD2 层级，几何体模型植物的形态特征可通过遥感影像解译，倾斜摄影或激光雷达点云数据，基于实例分割和凸包算法[28-31]，生成单颗树的简单几何体模型。LOD3 层级树冠为详细三角面模型，包含叶、花、果实等构件，反映树木的色彩、纹理等特征（图 2）。可基于相关建模工具和参数化算法（如 L-system 算法等）生成植物的分枝和根系[32-33]，并通过人工构建叶簇模型生成完整的植被模型。

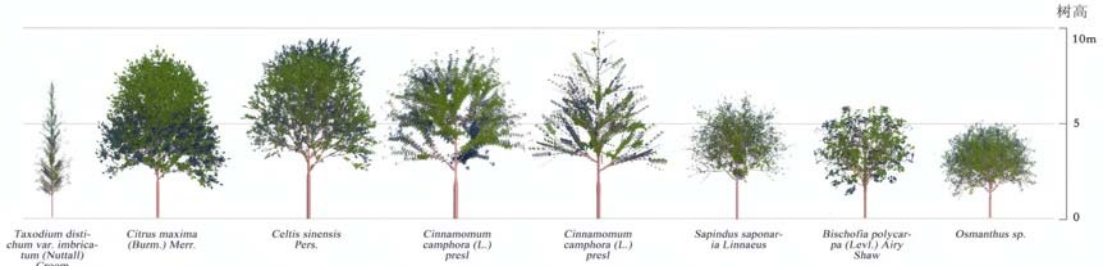


图 2 基于 L-system 算法生成的 LOD3 层级植被模型

3.3 语义信息

城市信息模型对象通常具有多项空间和非空间属性，用于表达模型的语义信息。CityGML 3.0 支持数字、字符串等简单属性值，也支持度量（qualified attribute）、代码列表（code list）、混合元组（tuple of different fields and values）和数字序列（list of numbers）4 种类型的复杂属性。

CityGML 3.0 中植被信息包含植物分类（class）、功能（function）、用途（usage）、物种（species）、树高（height）、冠幅（crownDiameter）、干径（trunkDiameter）、根球直径（rootBallDiameter）、最大根球深度（maxRootBallDepth）9 项信息。基于 CityGML 的可扩展特性，在植被信息模型的构建中可以在现有语义信息的基础上进行扩展，以满足不同的实际应用需求。本案例将指标分为分类学指标、形态特征指标、生理指标、文化特征指标、时间指标、构件特征指标、环境因素指标 7 个类型，27 项属性指标（表 6）。在模型构建中，各类不同属性信息相关数据可通过现场采集、文档提取等方式获得。在实践应用中，可在现有基础上，依据特定功能实践需求进一步进行扩展补充。

表 6 不同 LOD 层级植被的扩展属性

属性类型	属性名称	CityGML 属性名称	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3
基本信息	物种	species	*	*	*	*
	植物分类	class	*	*	*	*
	功能	function	*	*	*	*
	用途	usage	*	*	*	*
	物种别名	alternativeName	*	*	*	*
	生活型	livingType			*	*
	生长状况	livingCondition			*	*
形态特征	冠幅	crownDiameter	*	*	*	*
	树高	height	*	*	*	*
	干径	trunkDiameter	*	*	*	*
	根球直径	rootDiameter			*	*
	最大根球深度	maxRootBallDepth			*	*
生理特征	固碳类型	CO_2FixationType			*	*
	健康程度	healthCondition			*	*
	生长阶段	growthPeriod				*
文化特征	绿地类型	greenSpaceTypes	*	*	*	*
	权属信息	managementInfo		*	*	*
	人文特征	culturalInfo			*	*
时间特征	种植日期	plantingDate	*	*	*	*
市场信息	苗木来源	plantProvider			*	*
	苗木产地	plantOrigin			*	*
	单位价格	unitPrice			*	*
	土球标准	soilBallSpecification			*	*

注：* 表示该属性应用于对应的细节层级；下同。

不同构件可通过链接属性信息（如物理、生理和生态特征指标），用于生态环境和景观绩效模拟和分析（表 7）。部分指标类型随着生长与季相变化会发生相应变化，可通过折算系数表进行调整。各类属性数据来源，除基于场地的采样和计算外，可通过不同树种生长方程计算获取。随着倾斜摄影技术的发展，使用激光雷达扫描获得的点云数据用于几何模型的自动构建和生理特征相关生态指标的提取[34-35]。

表 7　不同植物构件的语义信息

构件名称	属性名称	CityGML 属性名称	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3
植物地上部分	植株体积	treeVolume	*	*	*	*
	植株生物量	treeBiomass	*	*	*	*
	固碳量	carbonFixationRate		*	*	*
	释氧量	oxygenReleasingRate		*	*	*
	蒸发量	evaporationRate		*	*	*
树冠	树冠体积	crownVolume			*	*
	树冠形态	crownShape			*	*
	树冠生物量	crownBiomass			*	*
	树冠空隙率	crownPorosity			*	*
枝干	枝干生物量	branchBiomass			*	*
	枝干强度	branchStrength			*	*
	枝干密度	branchDensity			*	*
	枝干颜色	branchColor			*	*
	分枝方式	branchingMode				
叶簇	花期	floweringStage				*
	花色	flowerColor				*
	花量	flowerAmount				*
	果期	fruitingStage				*
	果色	fruitColor				*
	果量	fruitAmount				*
	叶片类型	leafType				*
	叶片形态	leafShape				*
	叶片颜色	leafColor				*
	叶序	leafPositioning				*
	叶片质量	leafWeight				*
	叶片短波反射率	foliageShortwaveAlbedo				*
	叶片短波透射率	foliageShortwareTransmittance				*
植物地下部分	根系生物量	rootBiomass	*	*	*	*
	根系密度	rootAreaDensity		*	*	*
	根球形态	rootBallShape		*	*	*

3.4　时间序列

植物的形态特征和属性信息可以随着植物的生长发生变化。现有城市信息模型的时间变化通常基于版本管理（Version Management）实现[36]。植物生长模型的相关形态和属性指标可通过植物生长模型进行模拟生成[37]。

CityGML 3.0 支持建造时间（date Of Construction）、更新时间（date Of Renovation）、拆除时间（date Of Demonlition），以及 validateFrom 和 validateTo 两项生命周期属性。基于 CityGML 特征标识符和双时间戳的组合[4]，实现对植被模型的生长阶段编码，建立植物生长过程的模型序列，在 CityGML 中表达植物的生命周期（表 8）。其中，LOD0 和 LOD1 模型将植株作为整体，反映植物不同时期的形态大小变化；LOD2 和 LOD3 模型具有构件信息，反映构件组合和特征变化信息。

基于 CityGML 3.0 内建的时间戳属性，通过设定叶簇构件的时间序列，不同时间阶段的叶簇可附加花，果实等信息，模拟植物的季相变化过程。基于叶簇的形态特征变化，可以表达植被模型在不同时间段的外观特点和相应属性信息（表 9）。

表 8 植物生长序列的不同状态

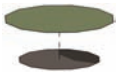
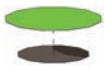
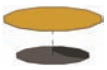
细节层级	幼苗期	生长期	成熟期	衰老期
LOD0				
LOD1				
LOD2				
LOD3				

表 9 不同季节的植被模型

细节层级	春季	夏季	秋季	冬季
LOD0				
LOD1				
LOD2				
LOD3				

植物生长可以通过方程进行预测[38-40]，由于地域环境的差异，在使用生长方程进行预测时需要结合场地环境进行校准。近年来也有相关学者使用机器学习技术预测植物生长并获取相关生长过程[41-42]，或基于植物生长模拟，提取相关的特征指标，用于模型构建[43-44]。在模型的实践应用中，亦可通过定期的生长数据监测，基于植被模型的特征标识和时间戳，实现项目模型全生命周期的动态管理。

4 不同细节层级植被模型的构建案例

4.1 模型构建

依据前文提出的不同 LOD 层级，以武汉市青山江滩公园阳光草坪为例，构建相应 CityGML 植被模型。使用 ArcGIS Pro 和 SketchUp 作为建模工具，依托 ArcGIS Data Interoperability 和 FME 工具，基于节点式编程，生成不同层级 CityGML 植被模型（图 3）。

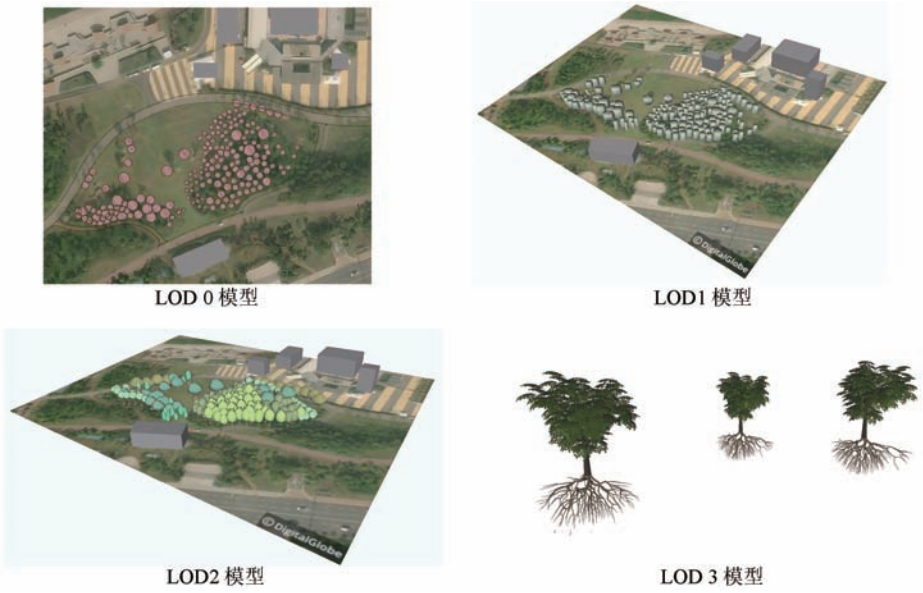


图 3　不同细节层级的 CityGML 模型构建

4.2　模型适用性

基于转换结果显示，LOD 0~3 各细节层级的转换流程可从 GIS 数据或 SketchUp 模型到生成 CityGML 植被模型，转换后的模型可与周边建筑和地形环境模型进行结合，实现几何特征与属性信息的融合表达。LOD3 植被模型详细的细节特征造成转换成果局限在少量乔木，用于表达单株简单群落的细节特征，但受限于模型性能，尚不能实现较大规模的应用，这与 CityGML 模型在表达建筑的现有应用情况一致。目前相关研究和实践中的 CityGML 城市模型尚以 LOD1~2 的应用为主，更高的 LOD 层级的 CityGML 主要用于表示地标模型或建筑单体[20]，其原因在于 CityGML 作为单文件 XML 模型，其编码过于冗长和复杂，对几何特征的表达缺少压缩和优化[45]。后续研究中可采用 CityJSON 等编码方式，实现模型的压缩和流式处理等功能，以实现更好的性能表现。

5　应用前景

1）标准化模型的构建需求。基于城市信息模型开放标准构建的植被不同细节层级的植被模型对象，可以完善现有城市信息模型标准中植被模块细节层级和属性信息的缺失，实现几何语义一体化的植被模型信息表达，并用于不同尺度下城市植被数字信息模型的构建。各细节层级的构建依托于 CityGML 现有建构筑物的细节层级设计，可实现与其他模型对象的集成和协同。相关属性指标需结合相关城市绿地监测评估和建模需求进行增减调整，以实现植被数据的快速共享和信息资源的高效利用，促进植物信息模型技术的标准化发展。

2）模型的数据获取途径。随着 CityGML 等开源语义标准的逐步建立和应用，不同层级的 CityGML 绿地模型可作为数字孪生城市的植被模型载体。不同级别几何体模型的构建可通过倾斜摄影或激光扫描技术建立植被外观模型，并进行实例分割和语义信息添加，实现多指标、多变量的绿地信息模型的快速构建，以作为绿地数字模拟和动态监测分析的数据基础。

3）数据结构限制与性能优化。由于城市信息模型的构建受制于所使用标准的数据结构，当前构建的植被模型也尚存一定限制。以 CityGML 的数据结构为例，由于 CityGML 的几何图形表达缺少优化和压缩，对于复杂植被特征的表达性能尚不理想，特别是 LOD3 层级植物特征，在多种复杂植被的情况下会造成模型转换时间过长和性能下降。如何针对不同使用需求，对高细节层级下的数字信息模型的性能进行优化，尚有待于深入研究。

4）植物连续动态生长过程的表达。由于现有各类城市信息模型标准通常针对人工设施设计，不能实现几何特征渐变的表达，对植物随着时间的生长和季相变化过程，各类城市信息模型通常基于离

散时间点可表达基于特定时间植物的几何特征和属性信息，但不能模拟植物生长过程的连续渐变。

5）绿地与环境要素的协同扩展。绿地监测和模拟与周边环境存在密切关联，对于植被周边建筑，铺装，道路等其他要素数据的模拟，需要依托相关城市信息模型现有建筑、交通、城市家具等对象要素构建模型，如何对其他各类要素进行扩展和完善，以更好的满足绿地规划设计和管理评估的实践需求，也尚需进一步的探讨。

参考文献

[1]焦思颖.《中共中央国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》解读(上)构建“多规合一”的国土空间规划体系[J].青海国土经略,2019(3):41-43.

[2]姜晓红.基于点云与 CityGML 的建筑物三维语义建模研究[D].武汉:华中师范大学,2020.

[3]张文元,刘润桦,万君璧,等.基于 CityGML 的明清古建筑三维语义模型扩展及转换研究[J].地球信息科学学报,2022,24(2):326-338.

[4]OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM.OGC City Geography Markup Language (CityGML) 3.0 Conceptual Model Users Guide [EB/OL].(2021-09-13)[2024-04-16].https://docs.ogc.org/guides/20-066.html.

[5]LÖWNER M O,BENNER J,GRÖGER G,et al.New concepts for structuring 3D city models-an extended level of detail concept forCityGML buildings [C]//Computational Science and Its Applications-ICCSA 2013.Berlin,Heidelberg:Springer,2013.

[6]GAO G,LIU Y S,LIN P P,et al.BIMTag:Concept-based automatic semantic annotation of online BIM product resources [J].Advanced Engineering Informatics,2017,31:48-61.

[7]OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM.OGC City Geography Markup Language (CityGML) Part 1: Conceptual model standard[EB/OL].(2021-09-13)[2024-06-19].https://docs.ogc.org/is/20-010/20-010.html.

[8]INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.ISO 19107:2003 Geographic Information-Spatial Schema[S].International Organization for Standardization,2003.

[9]FALKOWSKI K,EBERT J,DECKER P,et al.Semiautomatic generation of full CityGML models from images[J].Geoinformatik 2009,35:101-110.

[10]AGUGIARO G.First steps towards an integrated citygml-based 3d model of Vienna[J].ISPRS Annals of Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2016,III-4:139-146.

[11]JANEČKA K.Transformation of 3D geospatial data into CityGML-a case of Prague[J].Reports on Geodesy and Geoinformatics,2019,107(1):41-48.

[12]CITYGML WIKI.Open Data Initiatives in Germany[EB/OL].(2023-02-02)[2024-07-12].https://www.citygmlwiki.org/index.php title=Open_Data_Initiatives_in_Germany.

[13]GOBEAWAN L,LIN E S,TANDON A,et al.Modeling trees for virtual Singapore:from data acquisition to CityGML models[J].ISPRS - International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2018,6210:55-62.

[14]BEIL C,RUHDORFER R,CODURO T,et al.Detailed streetspace modelling for multiple applications:discussions on the proposed CityGML 3.0 transportation model[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2020,9(10):603.

[15]NEGA A,COORS V.The use of citygml 3.0 in 3d cadastre system:the case of Addis Ababa city[J].The International Archives of the Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2022,XLVIII-4/W4-2022:109-116.

[16]KUTZNER T,THOMAS H.Kolbe.GitHub-tum-gis/ifc-to-citygml3:An FME workspace for converting IFC data sets to CityGML 3.0 data sets [EB/OL].(2023-03-07)[2023-04-28].https://github.com/tum-gis/ifc-to-citygml3.

[17]SON H N,THOMAS H K.Tum-gis/citygml2-to-citygml3[EB/OL].(2024-03-07)[2024-04-28].https://github.com/tum-gis/citygml2-to-citygml3.

[18]ESRI.CityGML—3D Workflows[EB/OL].(2024-02-23)[2024-07-12].https://doc.arcgis.com/en/3d/workflows/content/citygml.htm.

[19]GIORGIO AGUGIARO,KONSTANTINOS PANTELIOS,TENDAI MBWANDA,et al.GitHub-tudelft3d/3DCityDB-Tools-for-QGIS:This repository contains code of a QGIS plugin that facilitates data handling of the CityGML 3D City Database.[EB/OL].(2024-07-12)[2024-07-12].https://github.com/tudelft3d/3DCityDB-Tools-for-QGIS.

[20]3DCityDB.3D City Database V5[EB/OL].(2024-07-12)[2024-07-12].https://github.com/3dcitydb/3dcitydb.

[21]UNITED-BIM.The Origin of LOD[EB/OL].(2023-05-25)[2023-05-25].https://www.united-bim.com/bim-level-of-development-lod-100-200-300-350-400-500/.

[22]BUILDINGSMART.Industry Foundation Classes (IFC)-An Introduction[EB/OL].(2024-05-25)[2024-05-25].https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/.

[23]KOLBE T H,GRÖGER G,PLÜMER L.CityGML:interoperable access to 3D city models[M]//Geo-information for Disaster Management.Berlin,Heidelberg:Springer,2005.

[24]SANDERSON L.BIM to GIS (Intermediate) IFC LOD 300 to LOD 4 CityGML[EB/OL].(2024-05-25)[2024-06-19].https://community.safe.com/s/article/bim-to-gis-intermediate-ifc-lod-300-to-lod-4-cityg.

(下转第 139 页)