引文格式：张琛,彭锦明,马丁,等. 城市三维场景中草地建模的边界问题与优化方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(6):60-66. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.06.011

城市三维场景中草地建模的边界问题与优化方法

张　琛[1,2,3]，彭锦明[1]，马　丁[1,3]，谢羿舟[1]，盛兆阳[4]
（1. 深圳大学 建筑与城市规划学院智慧城市研究院，广东 深圳 518060；
2. 自然资源部 数字制图与国土信息应用重点实验室，湖北 武汉 430079；
3. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室，广东 深圳 518060；
4. 武汉大学 资源与环境科学学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：草地建模是城市三维场景真实感表达的重要因素之一。随着图形渲染能力提升，对象化草地建模方法逐渐取代传统大范围重复贴图，但在边界处易出现材质过渡生硬及模型几何相交。本研究从三维模型拓扑关系视角分析问题本质，提出基于距离场的材质融合方法，实现区域边界的连续渐变；同时设计分区控制算法，将草地区域划分为边界域与内部域，差异化约束草体模型放置以避免几何相交。结果表明，材质融合消除了锯齿接缝，分区控制改善了边界草体排列并避免模型冲突。视觉感知实验中，相较于优化前场景（平均值7.2），选择优化后场景的人数更多（平均值12.8）。研究有效解决了草地边界的材质与几何问题，提升了三维场景的视觉真实感，可为实景三维与数字孪生应用提供技术参考。

关键词：真实感表达；城市草地三维场景建模；拓扑关系；边界优化；三维GIS与地图
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）06-0060-07

Boundary Issues of Grassland in Urban 3D Scene Modeling and Its Optimization Methods

ZHANG Chen[1,2,3], PENG Jinming[1], MA Ding[1,3], XIE Yizhou[1], SHENG Zhaoyang[4]
(1. Research Institute for Smart Cities, School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. Open Research Fund Program of Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China;
3. State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Shenzhen 518060, China;
4. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Grassland modeling is a key factor in the realistic representation of 3D urban scenes. Advances in graphics rendering have popularized object-oriented grassland modeling, which uses 3D grass models with geometry and materials instead of large-scale repetitive textures. However, this approach faces two practical issues, such as abrupt material transitions and geometric intersections at boundaries, both of which reduce visual realism. In this study, we analyzed these issues from a topological perspective, identifying them as topological conflicts at boundaries, and applied a distance field-based material blending method to achieve smooth material transitions between different area types. Additionally, we proposed a control algorithm to avoid geometric intersections between grass models and other 3D objects. The algorithm divided grassland into boundary zones and interior zones, implementing different control mechanisms for each. Experiments qualitatively compared the visual realism before and after boundary optimization, and quantitatively assessed performance improvements. The result shows that material blending eliminates jagged seams between areas, simulating natural gradual transitions. After zone division, boundary grass models align neatly without intersecting other objects. In the visual realism perception experiment, the optimized scene received higher selection scores (mean 12.8, median 12.5) compared to the pre-optimized scene (mean 7.2, median 7.5). This study effectively resolves geometry and material issues at grassland boundaries, enhancing realism in natural scene modeling and supporting 3D real scene city construction.

Key words: realistic representation, urban grassland 3D scene modeling, topological relationship, boundary optimization, 3D GIS and map

照片级真实感是GIS可视化的核心目标，从地图符号到实体模型、从二维图纸到实景三维的演进，均体现出对真实感表达的持续追求[1-3]。城市中的多类型要素及复杂空间关系使得城市三维场景的建模面临较大挑战[4-5]。自然场景是城市三维场景的重要组成部分，包含树木、草地、水体等地理实体，高逼真的自然场景建模能够显著增强沉浸感[6-7]。其中，草地面积广、分布密集，对场景真实感影响尤为显著。传统方法多采用纹理贴图并进行大范围重复填充[8-10]，易产生明显重复感，且近距离观察时因分辨率不足而出现模

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42401509）；自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室开放研究基金资助项目（ZRZYBWD202408）；国家资助博士后研究人员计划（GZB20240459）。
第一作者简介：张琛（1997—），博士，主要从事三维地图与GIS研究，E-mail: czhang@szu.edu.cn。

糊。随着图形渲染技术的发展，基于三维草体模型的实例化方法逐渐成为提升真实感的重要途径[11]。

然而，该方法在应用中仍面临两类关键问题：其一是材质层面，自然环境中草地与水体、道路等要素之间通常存在渐变过渡，这是典型的边界不确定性现象[12]，如何实现不同要素间的自然融合、避免生硬边界，是需要解决的问题之一；其二是几何层面，草体模型具有体积，当模型锚点位于区域边界时，模型容易溢出至相邻空间并与其他模型发生相交，形成“z-fighting”现象[13]。从泛地图学角度看，该问题与地图制图中的符号冲突具有一定相似性，即不同对象在有限空间中的压盖与交叉问题。

相关研究中，早期草地表达方法多借助粒子系统模拟草叶形态[14]；随后，基于Wang-Tile算法的方法通过单元重复实现草地布局，但存在明显接缝[15]；四向无缝排列虽改善了接缝问题，但重复感仍较突出[9]。此外，基于网格、随机函数与统计模型的方法能够使草体分布满足一定统计规律[16-17]，但对边界区域与其他要素之间的空间关系考虑不足。另一方面，地图符号冲突处理领域已形成较成熟体系[18-22]，“先处理、后符号化”策略为高密度符号组织提供了有效思路[23]，相关方法近年来也逐步向智能化演进[24-25]。与此同时，三维GIS中的拓扑关系研究持续关注模型间的冲突与组织问题[26]，并提出组合数据模型、共形几何代数等方法用于三维空间拓扑表达[27-29]。近年来，相关研究进一步扩展至可视化与空间分析领域[30-31]，大量工作聚焦于树木与建筑、道路与地形等对象之间的关系处理[32-34]。相比之下，草体模型数量庞大、体积较小，其冲突处理方式具有特殊性。

综上，本文以草地场景为研究对象，提出一种面向草地边界的优化方法，以提升三维场景的视觉真实感，并探讨模型间拓扑关系的变化规律，为其他类型自然要素的相关研究提供参考。

1　草地建模的边界问题分析

对象化建模方法使用独立草体模型，能精细表达草叶细节，且几何结构支持弯曲、扭转、飘动等形变效果，在近距离和风环境下更具真实感[35]。然而，该方法在边界处的建模细节尚需优化，主要体现在材质与几何两个层面。

在材质层面，现实世界中草地与水体、道路、石板等要素的边界通常呈渐变过渡，若在场景中直接拼接则会导致边界处出现平整明显的锯齿接缝，具有较强的人工合成感，如图1所示。

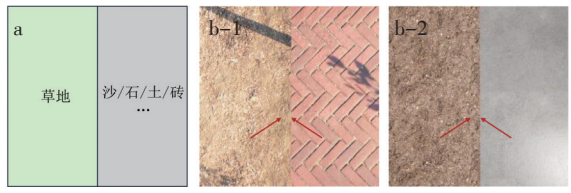


图1　草地材质与其他类型材质的接缝

在几何层面，草体模型自身具有几何三角网，其所占据的三维空间并非规则形状，因而当模型锚点位于区域边界时，模型本身容易溢出至相邻空间并与其他三维模型产生相交，形成“z-fighting”现象，对真实感造成较大负面影响，如图2所示。

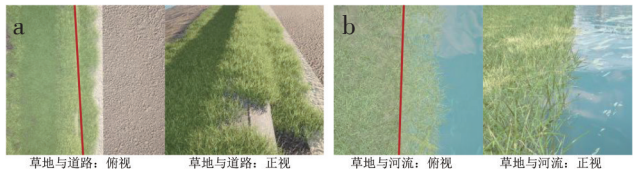


图2　草体模型与其他模型的几何穿透

从拓扑关系角度来看，上述两类问题的本质均属于三维模型间的拓扑关系问题。如图3所示，左侧是不同类型区域边界处的材质过渡，其真实情况是区域1与区域2之间存在一定的混合区域，体现了现实世界中物质之间的交互渗透；而一般方法仅在两个区域内部赋予对应材质，致使区域间形成明显接缝，人类视觉系统的马赫带效应[36]进一步增强了该接缝的显著性。解决该问题的方法是使两个区域在边界处彼此融合一部分材质，此时两个要素的拓扑关系从相邻变为相交。右侧是模型的几何交叉，现实中草体叶片会超出边界线，但在场景中若按此方式放置则会导致穿模，解决方法是将边界处草体模型向内移位，使模型与边界的拓扑关系从相交转换为相邻。从泛地图学视角来看，上述模型冲突问题与地图制图中的符号冲突具有相似性——点、线、面符号同样需要处理压盖、交叉等问题，区别在于冲突对象由符号转变为具有体积的三维模型。

2　草地建模的边界优化方法

本文采取的三维草地场景完整建模路线：首先输入图像并提取草地区域的矢量边界，该矢量边界将作为材质赋值和点位生成的直接数据；开展边界融合和分区计算两项任务，该环节将生成混合材质与模型放置点位；在渲染引擎中按照点位生成草体模型的实例，形成大范围的草地场景。其中，边界优化环节的方法细节如下。

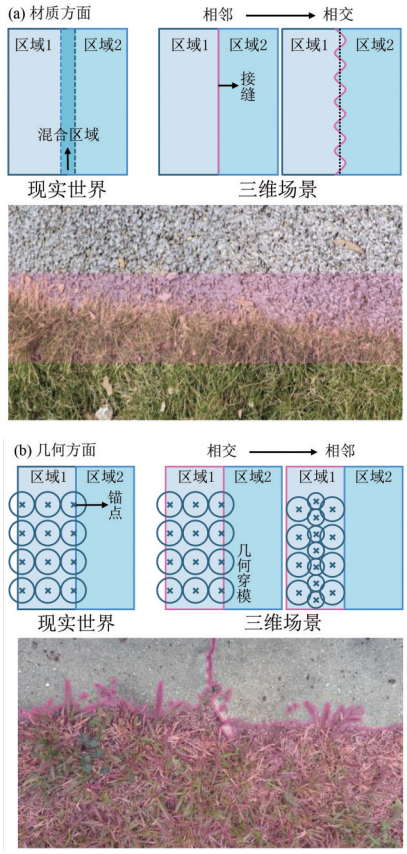


图3　两类矛盾的拓扑关系解释

2.1　距离场边界融合

该方法旨在融合不同类型材质，从而实现区域边界平滑自然的过渡效果。方法利用距离场表示空间，基于距离场计算边界处材质融合的权重值，并生成新的材质属性用于赋值边界处地形[37]，具体步骤如下：

1）建立符号距离场。几何体的符号距离场指三维空间中任意点与几何体表面距离的函数，将空间中点到几何体表面的距离分为三类：位于内部为负值、位于表面为零值、位于外部为正值。基于距离场的材质融合属于程序化材质生成方法，点与表面的距离决定了该点处的材质参数值。

2）生成新的材质属性。基于距离场生成新材质的过程如图4所示。a 和 b 表示两个需要进行材质融合的三维模型，每个模型包含一个材质，每个材质均包含多个材质属性。过渡域为相邻边界处一定范围的缓冲区，本文要解决的问题之一即在该缓冲区内实现两种类型材质的融合。因此，过渡域的材质属性需要按照一定的权重进行重新计算，而权重值即根据空间距离场计算得出。距离场函数公式如下：

$$s(x)=\begin{cases}0, \#\text{if}-t/2\leqslant x\leqslant g\\ \dfrac{x-g}{t}, \#\text{if}\, g\leqslant xvt/2\end{cases} \tag{1}$$

式中，t 为过渡域的宽度；g 为过渡域的起始点，

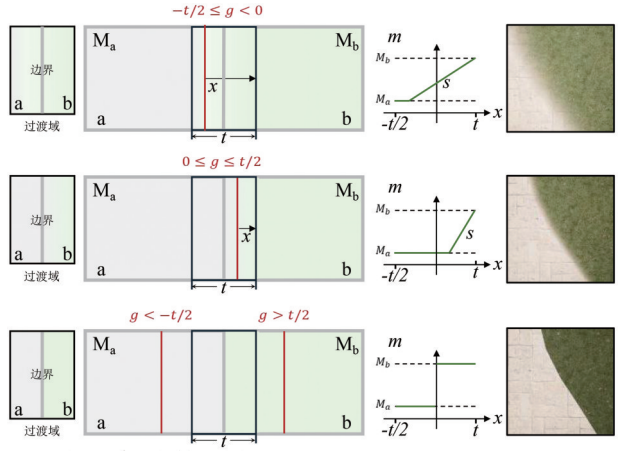


图4　基于距离场的材质融合

值域为 $[-t/2, t/2]$；x 为过渡域中的任一点，值域为 $[-t/2, t/2]$。由该式可计算出过渡域内任意点进行材质融合所需的权重值 $s(x)$。权重值 s 用于生成过渡域内新的材质 M，其计算公式如下：

$$\mathrm{M}=\mathrm{M_a}+s(x)\times(\mathrm{M_b}-\mathrm{M_a}) \tag{2}$$

式中，M_a 和 M_b 分别为 a 和 b 2个区域的材质属性；$s(x)$ 为材质融合的权重值，即式（1）计算所得结果。

3）选择融合方式。由公式（1）可知根据 g 的取值，融合结果分为3种：①完全融合（$-t/2\leqslant g<0$），两个区域材质均在过渡域中线性变化；②部分融合（$0\leqslant g\leqslant t/2$），仅区域 b 的材质在过渡域中线性变化；③未融合（$g>t/2$ 或 $g<-t/2$），过渡域材质不发生改变。

2.2　分区域密度计算

该方法实现两个效果：①划分边界域与内部域以防止几何相交；②对两个区域设置不同密度以减少草体模型总数，具体步骤如下：

1）划分边界域与内部域。草地种植区域分为边界域和内部域，两个区域内草体模型的种植密度不同，如图5所示。边界域宽度由草体模型大小决定，区域内草体模型放置后不会超出外边界和内边界，从而有效避免穿模。内部域的草体模型放置密度随与内边界距离的增加而降低，可在大范围草地建模中有效减少模型总数。

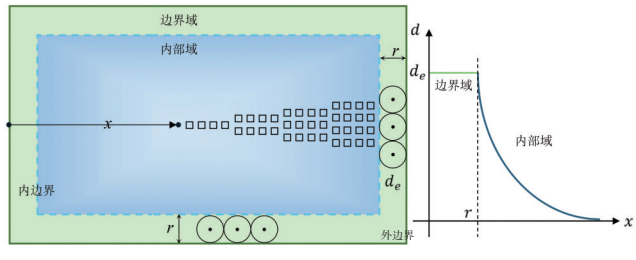


图5　草地场景的区域划分与密度计算

2）计算分区密度值。边界域与内部域的点位密度值不同，其计算公式如下：

$$d(x)=d_e\times e^{-k\cdot\max(0,x-r)} \tag{3}$$

式中，r 为边界域的宽度；x 为任意点与外边界的距离；d_e 为边界域的密度值，值域为 $[0,1]$，用于设定初始的模型密度；k 为密度衰减系数，值域为 $[0,10]$，用于控制密度衰减的速率。由该式可知，①当 $x\leqslant r$ 时，此时放置区域为边界域，模型的密度值不变；②当 $x>r$ 时，此时放置区域为内部域，模型的密度值不断衰减。

3）生成模型放置点位。边界域中为规则排列点位，其密度值恒定。内部域中模型的点位生成使用拒绝采样算法[38]，具体算法过程如表1所示。算法采样频率受密度函数值约束，最终可达到减少场景中所使用草体模型个数的效果。

表1　内部域模型点采样算法

函数名：Generate_Interior_Points(d_e, k, r, n)
描述：内部域模型放置点采样算法
输入：d_e, k, r, n ← d_e 为边界域密度，k 为密度衰减系数，r 为边界域的宽度，n 为点数
输出：$P=[p_0,p_1,p_2,\cdots,p_{n-1}]$ ← 区域内生成的点位集合
1. for i in range $(0,n)$ do ← 循环变量
2. $p_i=(x,y)$ ← 区域内随机生成一个点位
3. $s=\min(\lvert x-x_e\rvert,\lvert y-y_e\rvert)$ ← 该点距离边界的最小值
4. $d=d_e\bullet e^{-k\cdot\max(0,\ s-r)}$ ← 计算该距离下的密度值
5. $g=\text{random}(0,d_e)$ ← 生成范围在 $(0,d_e)$ 之间的一个随机数
6. if $g<d$ do ← 概率接受：随机数小于密度值 d 则保留该点
7. P.append(p_i) ← 将该点加入点位数组

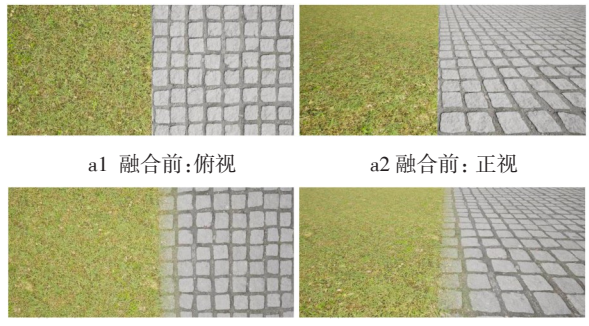
3　实验与分析

实验设备为3.2 GHz基准速度、24核的Intel(R) Core(TM) i9-14900KF CPU处理器，16 GB显存的NVIDIA GeForce GTX 4080 GPU，3 840×2 160分辨率、60 Hz刷新率的显示屏。方法使用C++语言实现，实验中呈现的所有结果均使用虚幻引擎5.2进行渲染和导出，所用的草体模型纹理分辨率为2 048×2 048，单个数据量为108.105 KiB。实验验证了草地与相邻区域的材质融合效果及边界处的模型控制效果，并从定性和定量两个方面对比优化前后的草地场景。

3.1　结果展示

3.1.1　边界材质融合效果

草地与石板两类材质融合前后的效果对比如图6所示，a1和a2为融合前的俯视图和正视图，由图可知两类材质之间出现明显的锯齿边界，人眼易感知和判断出该场景为纹理贴图的人工拼接。相应地，b1和b2为材质融合后的俯视和正视效果，主要反映为草地对石板材质具有一定的侵蚀，有效体现了两类材质的自然过渡，使锯齿边界线变得渐变柔和，这与现实世界中物质之间的交互渗透是一致的。



a1 融合前：俯视　　a2 融合前：正视

b1 融合后：俯视　　b2 融合后：正视

图6　边界处材质融合前后的效果对比

此外，边界处材质融合的宽度与强度也可使用参数调整，其效果如图7所示。M_1 与 M_2 分别为草地与岩石的材质，初始状态下两者并未融合，具有明显的锯齿边界。图中（a）组与（b）组分别展示了不同的融合宽度，（a1）与（b1）中红色区域即过渡域，可通过参数调整过渡域宽度以体现不同的侵蚀范围。（a2）/（b2）与（a3）/（b3）为两类材质不同强度的融合，不同的融合强度所展现的视觉效果有所差异：（a2）/（b2）在保留初始边界的基础上进行了一定融合，而（a3）/（b3）已经完全覆盖了初始边界。该功能可用于表示随时间增加而展现出的不同侵蚀强度，根据实际应用情况调整参数以满足表达需求。

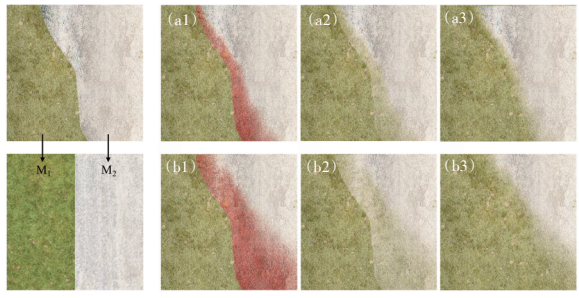


图7　不同距离场参数的边界材质融合效果

对于不同类型的材质融合，草地与常见的地表覆盖材质如沙、石、土、砖等均可实现过渡域的材质融合效果。无论是硬质（如石和砖）还是软质（如沙和土），草地在生长过程中都会与其他要素有不同程度的融合，这也是自然现象的一种体现，对于提升自然场景的真实感具有重要作用。

3.1.2　几何冲突处理效果

优化前后边界处模型的位置发生显著变化，有效地避免了几何冲突，如图8所示。a1/a2和b1/b2分别

为优化前和优化后的俯视图与正视图，在图a1和a2中，白色区域被设定为草地场景的范围，边界处的草体模型已经超出边界线。b1与b2划分了边界域与内部域，边界域的草地模型整齐排列，模型几何位于边界线内。进一步对比a2和b2可知，所提方法可完全在指定区域内生成草地场景，边界处模型与区域的边界线保持对齐。

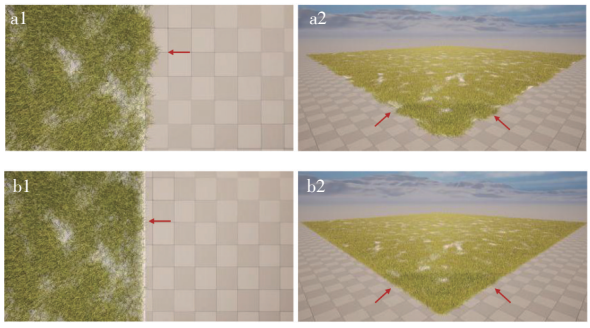


图8 边界模型放置效果图

该方法还可用于不规则区域下的草地场景建模，在实际的工程应用中具有重要价值，如图9所示。a1和a2为单区域生成，b为多区域同时生成。第一行表示区域的不规则多边形，第二行表示边界域模型放置，第三行展示完整的草地场景生成效果。由图可知，对于不规则的草地区域，所提方法也可根据区域范围划分出边界域与内部域，并计算内部域的点位信息从而快速生成覆盖全域的草体模型，该功能在大范围三维场景的草地建模时具有较好应用。

除了真实感的提升，实践过程中还发现算法对于场景渲染的效率提升也有积极意义。在公式（3）中，密度衰减系数 k 对草体模型总数及场景覆盖效果

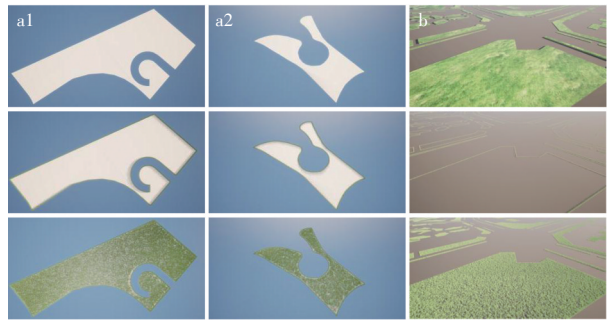


图9 不同范围下草地模型的生成效果

具有直接影响。如图10所示，第一行为根据密度函数计算的点位模拟图，第二行为密度函数曲线，第三行为渲染引擎中生成的草地场景效果图。$k=0$ 时场景全域密度值恒定，点位模拟呈均匀分布，密度函数曲线为直线，模型将密集覆盖草地全域；随着 k 值增大，函数生成的点个数显著减少，密度呈指数下降，靠近边界的草体模型密集而靠近中心的草体模型稀疏，场景中逐渐出现空白区域。表2记录了不同衰减系数下草体模型的生成数量，k 值的增加将使区域内草体模型数量逐渐减少。该特性主要用于模型总数的控制，即在确保视觉质量的前提下尽可能减少场景中所用模型数量：当 $k=0.5$ 至 $k=1$ 时，模型可基本覆盖草地全域，此时设置衰减系数可有效减少模型数量；当 $k\geqslant 3$ 后场景已出现模型无法覆盖的区域，不宜继续增大该值。

表3记录了一次场景优化前后在渲染引擎中的性能指标，可知当区域内草体模型较多时，分区域后可大幅减少所用的模型数量和生成时间，显存占用降低且画面帧率提高。总体上，分区计算对于草地场景的

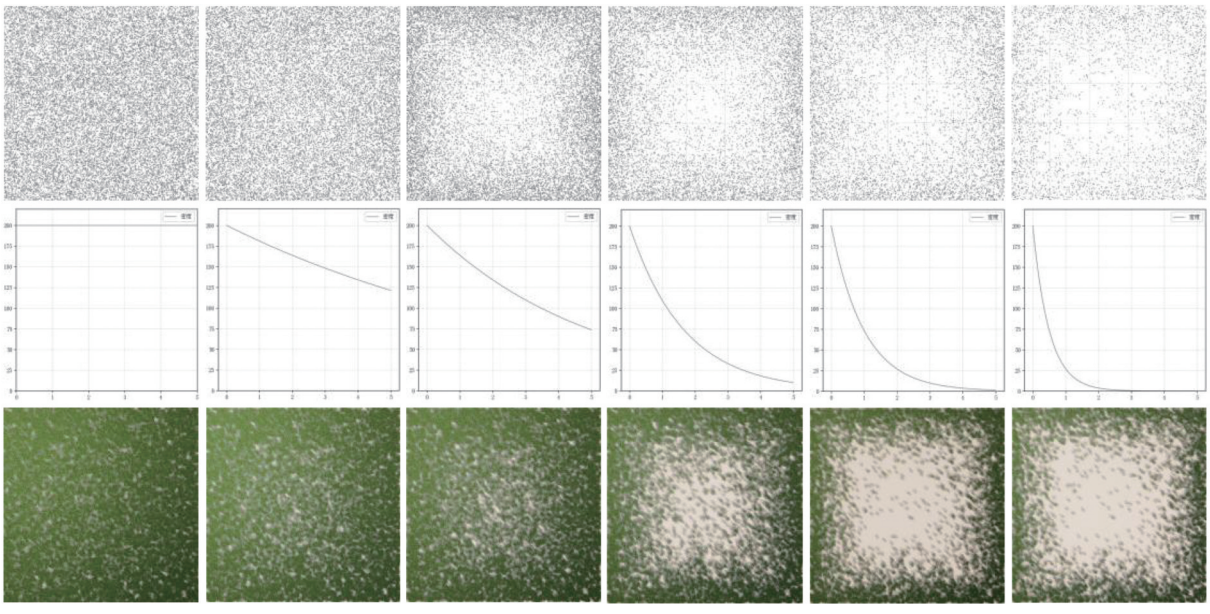


图10 不同系数下的草地场景生成效果

表2　不同系数下的模型生成数量

衰减系数	$k=0$	$k=0.5$	$k=1$	$k=3$	$k=5$	$k=10$
模型数量	20 000	17 045	14 715	9 110	6 411	3 601
降低率/%	—	14.7	26.4	54.4	67.9	82.1

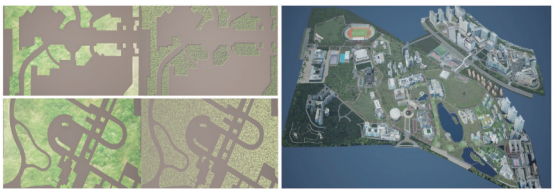
建模效果具有两处优化：第一点是边界处的草体模型不再超出区域范围而与其他模型产生相交；第二点是草体模型的生成数量减少，这对于大范围草地场景建模极为重要。

表3　密度控制对于渲染效率的提升

对比项	控制前	控制后	优化效果/%
模型数量	10 000 000个	7 357 588个	−26.42
模型生成时间	213.887 s	133.685 s	−37.51
显存占用	832 MiB	461 MiB	−44.59
帧率	23 fps	30 fps	+30.4

3.1.3　工具实践与感知评价

为验证本方法在真实城市场景中的应用效果，以校园场景为实验区域开展实例验证，如图11所示。a展示了局部区域的草地建模效果，b是将其应用于校园场景的建模效果。无论草地区域呈何种形状，模型均能与区域边界保持一致，这对于实际的工程应用具有重要意义。



a 局部区域建模效果　　b 校园场景建模效果

图11　案例实验效果

为量化评估边界优化对真实感的提升效果，实验批量生成50组优化前后的草地场景渲染图像，邀请20位志愿者（10位GIS专业、10位非GIS专业）在未告知研究背景的前提下，从随机抽取的10组图像中凭主观感受选择较具真实感的图像。选择优化后场景的平均值为12.8、中位数为12.5，优化前场景的平均值为7.2、中位数为7.5，表明边界优化方法对场景真实感的提升具有积极意义。

3.2　讨　论

随着数字孪生与实景三维应用的不断深化，城市中各类要素不仅需要数字化，整体上对真实感的要求也日益提高。现实自然场景中的花、草、树、木、土、水、路、石等要素均需使用对象化模型表达。本文所探讨的草地边界问题，本质上反映了三维空间实体关系表达的系统性挑战。若将场景视为地图的一种类型[39]，则上述模型冲突与地图制图中的符号冲突具有内在相似性，区别在于冲突对象由符号转变为具有体积的三维模型，要素间的空间关系随之发生了本质改变。当场景中各要素均以三维模型表达时，错误的空间关系（如树木模型与道路模型相交、草地模型与水体模型重叠等）不符合视觉认知，会严重降低真实感。因此，亟需系统梳理各类型要素间的关系并形成知识图谱，进而构建面向真实感表达与空间分析的模型约束规则。

4　结　语

本文主要聚焦三维场景中草地建模的边界问题，提出了基于距离场的材质融合与分区域密度计算方法，分别解决边界处的材质过渡和几何冲突，实现了不同类型材质的自然融合以及边界域和内部域草体模型的控制，有效提升了草地场景的视觉真实感，可为实景三维中国和数字孪生城市等应用实践提供技术支持。

更重要的是，研究体现了真实感这一目标的复杂性：真实感表达不仅仅依赖于图形学中的渲染绘制技术，空间实体的位置、形态、分布及关系等也是整个地理环境建模过程中应该考虑的因素。这些因素在三维场景中往往展现出不同于二维地图的新形式，因此有可能产生新的地图学与GIS理论研究。后续将建立场景中不同类型要素间的拓扑关系图谱，为三维模型的位置生成与冲突解决提供系统性的理论支撑。

参考文献

[1] 高俊. 地理空间数据的可视化 [J]. 测绘工程,2000,9(3):1-7

[2] Appleton K, Lovett A. GIS-based Visualization of Rural Landscapes:Defining Sufficient' Realism for Environmental Decision-making[J]. Landscape and Urban Planning, 2003,65(3):117-131

[3] 闾国年,俞肇元,袁林旺,等. 地图学的未来是场景学吗?[J]. 地球信息科学学报,2018,20(1):1-6

[4] 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

[5] 高铜祥,唐伟,崔海涛,等.斋堂水库水陆一体化三维模型构建和库容计算[J].地理空间信息,2026,24(1):92-96

[6] Paudel S, States S L. Urban Green Spaces and Sustainability:Exploring the Ecosystem Services and Disservices of Grassy Lawns Versus Floral Meadows[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2023,84:127932

[7] Mrosla L, Fabritius H, Kupper K, et al. What Grows, Adapts and Lives in the Digital Sphere? Systematic Literature Review on the Dynamic Modelling of Flora and Fauna in Digi-

tal Twins[J]. Ecological Modelling,2025,504:111091

[8] 邱航,陈雷霆,Chen J X,等. 草地场景真实感模拟技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(9):1628-1638

[9] 郭雪,杨刚. 基于层状纹理方法的真实感草地动态实时模拟[J]. 计算机应用研究,2014,31(8):2543-2547

[10] 朱庆. 三维GIS及其在智慧城市中的应用[J]. 地球信息科学学报,2014,16(2):151-157

[11] 王子豪. 大规模草地渲染与仿真关键技术[D]. 重庆邮电大学,2022

[12] 史文中,王树良. GIS数据之属性不确定性的研究[J]. 中国图象图形学报,2001,6(9):106-112

[13] Jintawatsakoon S, Aribarg A. Image-based Z-fighting Detection in 3D Renders Using Deep Learning Approaches[C]//Proceedings of the 2025 17th International Conference on Knowledge and Smart Technology, Bangkok, Thailand,2025:1-6

[14] Reeves W T, Blau R. Approximate and Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems[J]. Acm Siggraph Computer Graphics, 1985, 19(3):313-322

[15] 张淮声,华炜,余莉,等. 基于层次多项式纹理的实时草地绘制[J]. 软件学报,2006,17(增刊):85-92

[16] Fan Z, Li H, Hillesland K, et al. Simulation and Rendering for Millions of Grass Blades[C]//Proceedings of the 19th Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. San Francisco, California; Association for Computing Machinery,New York,NY,USA. 2015:55-60

[17] Gasch C, Sotoca J M, Chover M, et al. Procedural Modeling of Plant Ecosystems Maximizing Vegetation Cover[J]. Multimedia Tools and Applications,2022,81(12):16195-16217

[18] 刘纪平. 地图数据库图形输出中要素关系处理[J]. 测绘学报,1994,38(3):222-228

[19] 武芳,巩现勇,杜佳威. 地图制图综合回顾与前望[J]. 测绘学报,2017,46(10):1645-1664

[20] Højholt P. Solving Space Conflicts in Map Generalization: Using a Finite Element Method[J]. Cartography and Geographic Information Science,2000,27(1):65-74

[21] 周启,艾廷华,张翔. 面向多重空间冲突解决的移位场模型[J]. 测绘学报,2013,42(4):615-620

[22] 赵变利,刘建军,刘剑炜,等. 面向自动制图的地图符号拓扑冲突处理方法[J]. 时空信息学报,2023,30(4):518-526

[23] 李霖,于忠海,朱海红,等. 地图要素图形冲突处理方法:以线状要素(道路、水系和境界)为例[J]. 测绘学报,2015,44(5):563-569

[24] Kang Y, Gao S, Roth R E. Artificial Intelligence Studies in Cartography:A Review and Synthesis of Methods, Applications, and Ethics[J]. Cartography and Geographic Information Science,2024,51(4):599-630

[25] 王迪,钱海忠,赵钰哲. 综述与展望:地理空间数据的管理、多尺度变换与表达[J]. 地球信息科学学报,2022,24(12):2265-2281

[26] 华巍,胡云岗,侯妙乐. 三维GIS数据融合的基本方法与进展[J]. 地理信息世界,2018,25(5):12-17

[27] De La Losa A, Cervelle B. 3D Topological Modeling and Visualization for 3D GIS[J]. Computers & Graphics, 1999, 23(4):469-478

[28] Lee J, Kwan M P. A Combinatorial Data Model for Representing Topological Relations Among 3D Geographical Features in Micro-spatial Environments[J]. International Journal of Geographical Information Science,2005,19(10):1039-1056

[29] 袁林旺,俞肇元,罗文,等. 基于共形几何代数的GIS三维空间数据模型[J]. 中国科学(地球科学), 2010, 40(12):1740-1751

[30] 杨灿灿,江岭,陈昕,等. 面向城市DEM构建的地形要素分类及表达[J]. 地球信息科学学报,2017,19(3):317-325

[31] Chaves C A. Defining and Designing Spatial Queries:The Role of Spatial Relationships[J]. Geo-spatial Information Science,2024,27(6):1868-1892

[32] Xu D, Zlatanova S. An Approach to Develop 3D Geo-dbms Topological Operators by Re-using Existing 2D Operators[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2013, II-2/W1:291-298

[33] 江禹,李永树,鲁恒,等. 三维场景建模中地物与地形匹配方法研究[J]. 测绘通报,2013(5):96-100

[34] 张佳威,石硕,武瑞宏,等.基于Cesium实景三维可视化技术的铁路站区更新应用研究[J].地理空间信息,2025,23(9):71-74

[35] Lu S, Fang C, Xiao X. Virtual Scene Construction of Wetlands:A Case Study of Poyang Lake, China[J]. ISPRS International Journal of Geo-information,2023,12(2):49

[36] 李元勇. 基于人类视觉机制的马赫带效应研究[J]. 现代仪器,2008,25(6):45-47

[37] Pharr M, Jakob W, Humphreys G. Physically Based Rendering:From Theory to Implementation[M]. MIT Press,2023

[38] Casella G, Robert C P, Wells M T. Generalized Accept-Reject Sampling Schemes[J]. Lecture Notes-monograph Series,2004,45:342-347

[39] 郭仁忠,陈业滨,马丁,等. 论ICT时代的泛地图表达[J]. 测绘学报,2022,51(7):1108-1113