

# Mind3D 场景高渲染技术方案

近年来，随着数字孪生、智慧水利、低空经济以及地灾应急等领域的快速发展，三维技术的应用深度正在不断提升。

从最初的二维 GIS 到三维场景展示，再到如今融合仿真分析与实时数据的数字化平台，三维系统的角色已经发生了根本变化：

不再只是“可视化工具”，而是逐渐成为承载空间信息、表达动态过程与支撑业务决策的核心基础设施。

在这一演进过程中，CesiumJS 凭借其全球尺度场景管理能力与开放架构优势，已经成为 Web3D 领域最重要的技术底座之一，并在水利、自然资源、城市治理等多个行业中得到广泛应用。

然而，随着应用不断深入，新的问题也逐渐显现：

传统三维场景虽然能够完整表达数据，但在真实感、环境氛围以及过程表达方面仍然存在明显不足。

多源数据之间缺乏统一视觉语境，动态过程难以融入真实环境，大尺度场景在空间层次与沉浸感上也存在局限。

在这样的背景下，高渲染能力逐渐从“效果增强手段”，转变为“三维平台的基础能力”。

围绕真实感、统一性与动态表达，一套基于 CesiumJS 深度拓展的高渲染体系正在形成，并推动三维场景从“展示空间”走向“环境表达”。

本文将结合当前实践，对这一体系中的关键能力进行系统梳理，探讨 CesiumJS 在 2026 年高渲染方向上的演进与应用价值。

## 一. HDR 渲染管线：重构 Cesium 底层渲染能力

在高渲染体系中，最核心的基础，是对 Cesium 原有渲染流程的整体扩展与重构。

不同于传统前向渲染模式，该体系引入了更接近游戏引擎的独立渲染管线，使 Cesium 从“地理渲染引擎”升级为“通用高渲染平台”。

在底层能力上：

- 构建完整的延迟渲染体系，支持复杂光照计算与多通道数据表达
- 深度使用 FBO、UBO、Transform Feedback 等机制，实现 GPU 级优化
- 支持多级抗锯齿（TAA / SMAA），在保证清晰度的同时提升稳定性
- 引入 HDR 渲染链路，支持 Bloom、自动曝光（Eye Adaptation）等效果
- 支持 SSR 屏幕空间反射，使水体、建筑具备真实反射关系
- 支持海量动态光源（数千级），满足夜景城市、应急照明等复杂场景

在表现层面：

- 提供多种环境光照模型（环境光、半球光、IBL 等）
- 支持镜头畸变与微缩（Tilt-Shift）效果，增强表达能力
- 构建统一后处理体系，使所有效果参与同一渲染流程

对于 Cesium 应用而言，这一变化的意义在于：场景不再是“Primitive+ 后处理”的简单组合，而是具备完整渲染逻辑的环境系统。

在水利、城市与应急场景中，这意味着：

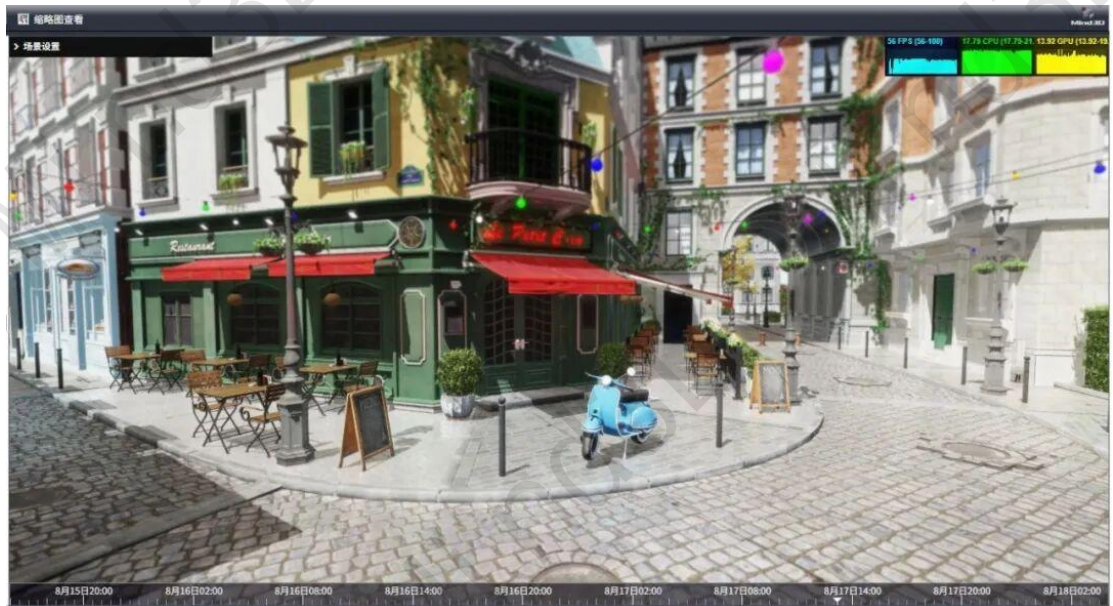
- 夜景与应急光源可以真实参与空间计算
- 洪水、水体与周边环境形成统一反射关系
- 多源数据在同一视觉体系下自然融合

### 1. 海量光源支持 (3k+)



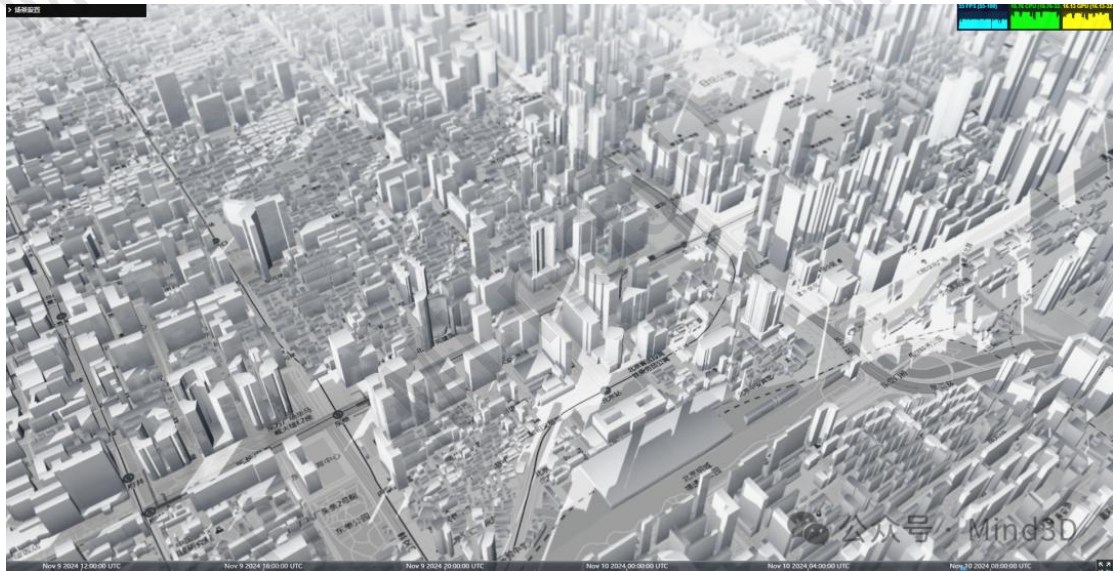


## 2. TAA、SMAA 抗锯齿支持



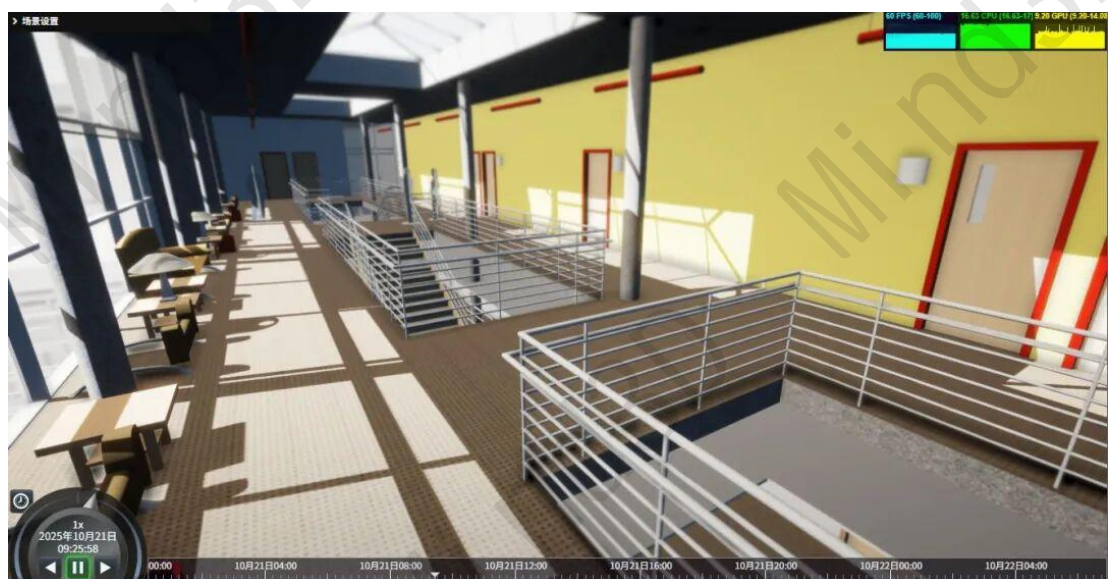
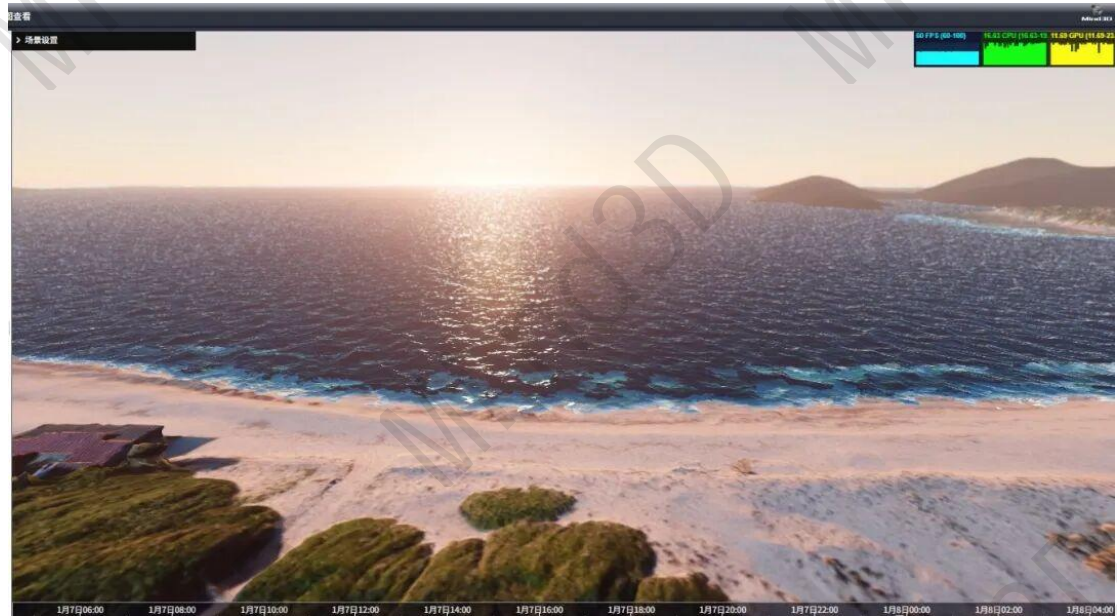
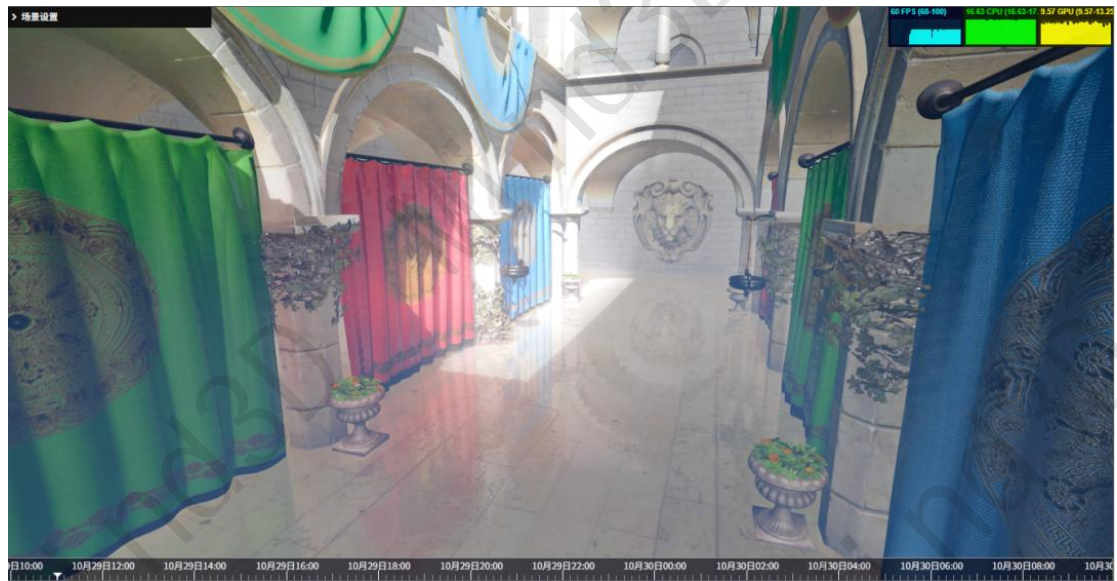


### 3. SSAO、SSR、镜头特效支持





#### 4. HDR、Bloom、SSGI、SSRT、自动曝光支持





## 二、动态天空系统：构建完整环境渲染体系

在高渲染体系中，天空不再是背景，而是整个环境系统的核心。

该系统以真实大气模型为基础，构建了一套完整的环境渲染方案：

- 支持大气散射与空气透视，还原真实天空颜色变化
- 引入高质量体积云系统，支持动态演化、阴影投射与体积光交互
- 提供 HDR 级全球体积云渲染能力，适用于大范围场景
- 支持多种天气系统（晴天、阴天、暴雨、风暴等）
- 与场景光照、雾效、环境色形成统一联动

这一体系的关键不在于单一效果，而在于“整体一致性”。

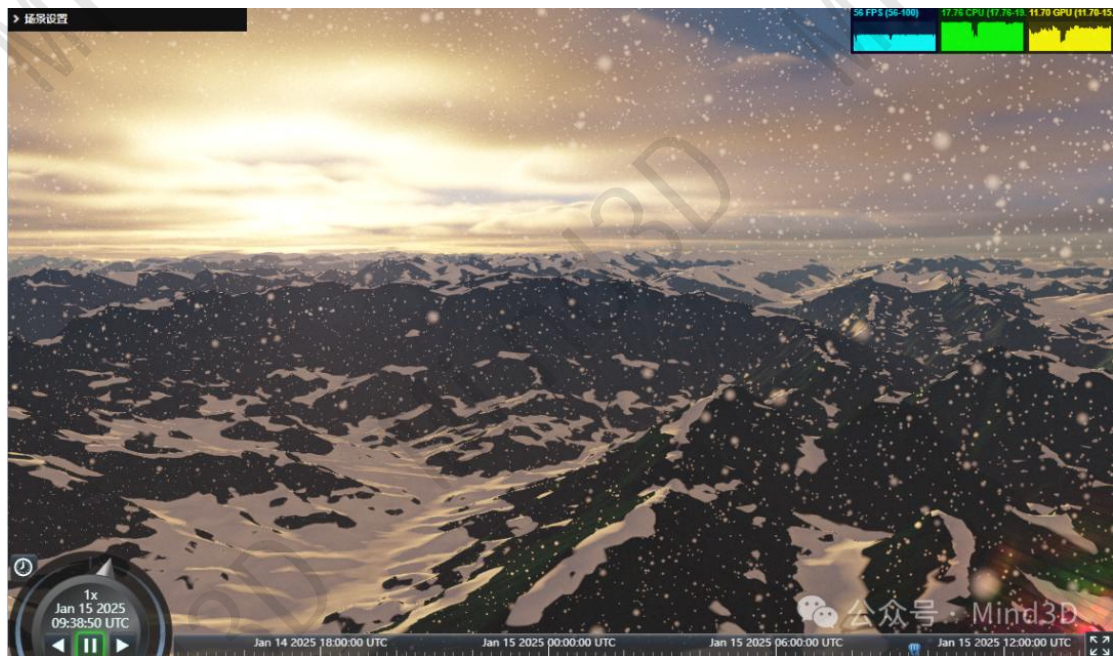
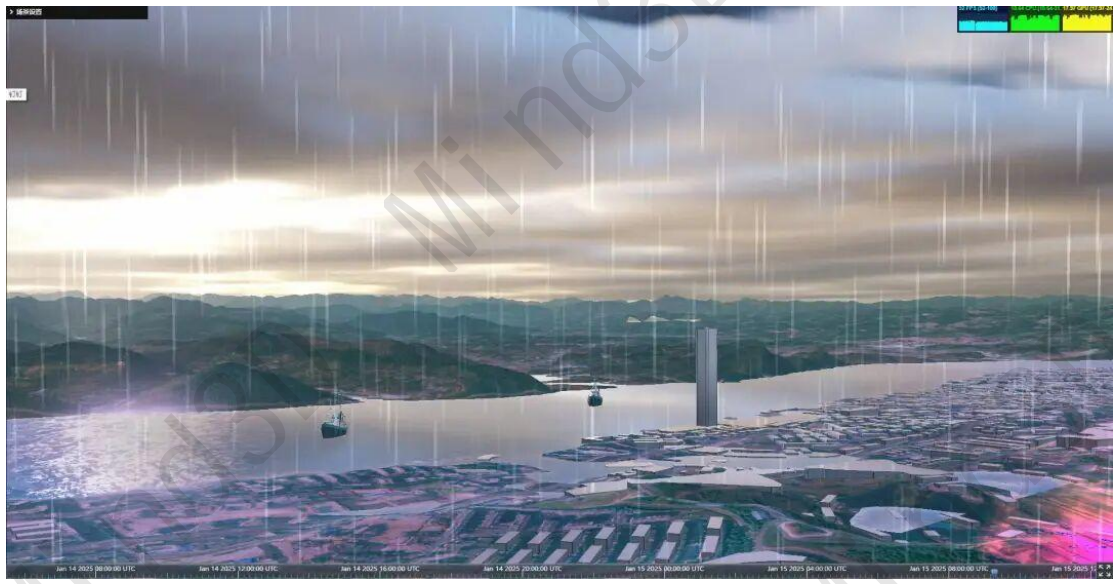
在 Cesium 场景中，天空系统与时间系统、光照系统形成强耦合关系：

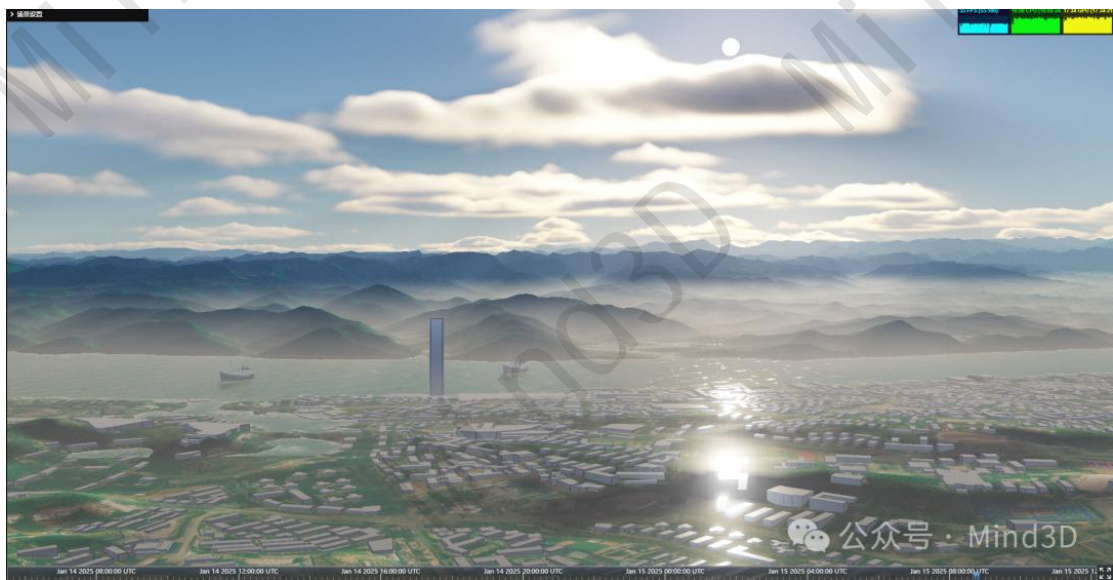
- 时间变化驱动太阳角度 → 影响光照 → 改变场景结构
  - 天气变化驱动云层与雾气 → 改变空间层次 → 影响可见性
- 在行业应用中，这种能力具有直接价值：

- 水利场景中的暴雨环境表达
- 台风路径模拟中的天空变化
- 夜间应急场景中的真实光照氛围

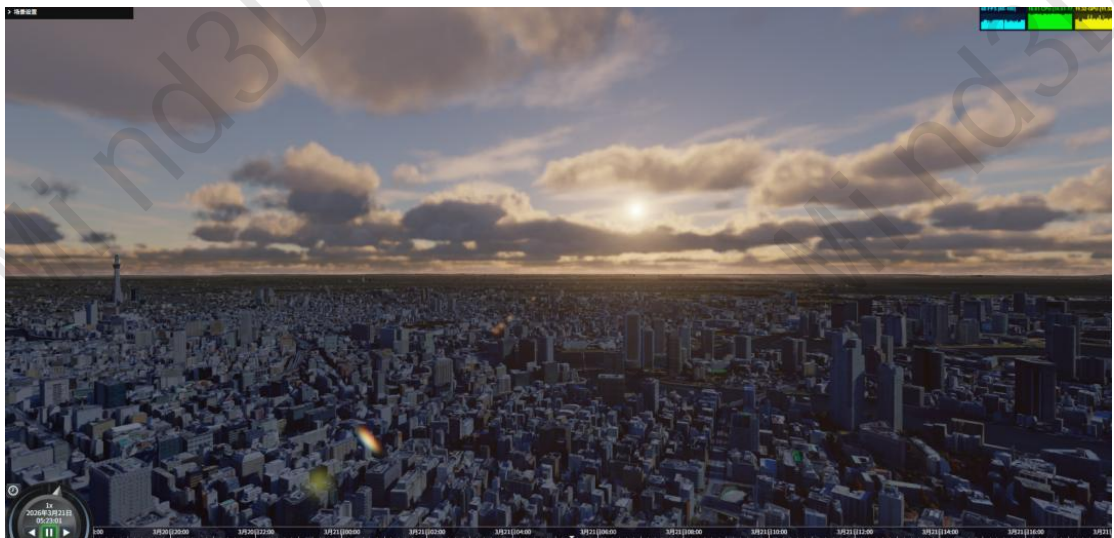
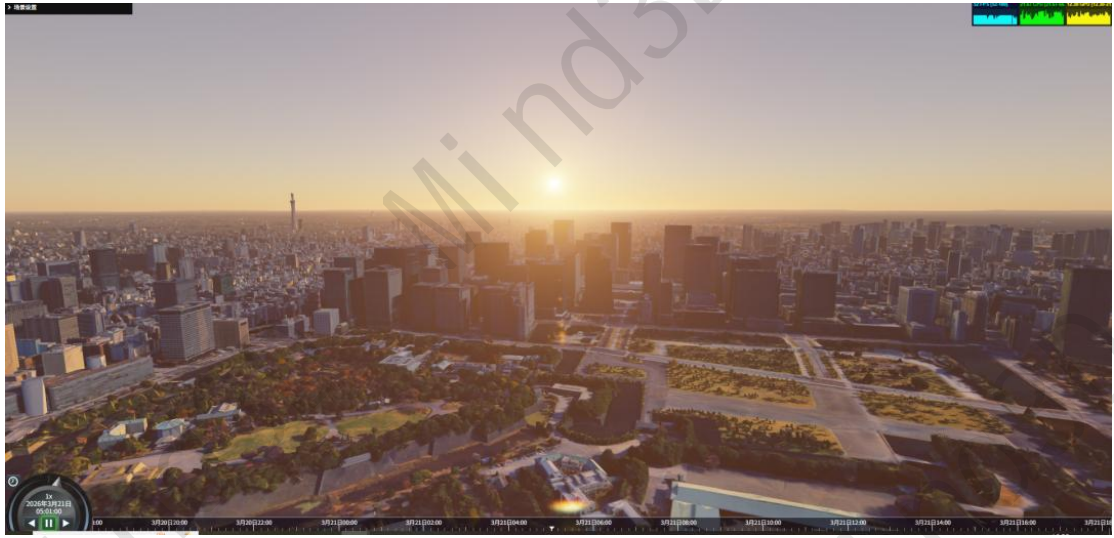
Cesium 场景开始真正具备“环境语境”。

# 1. 动态天气系统



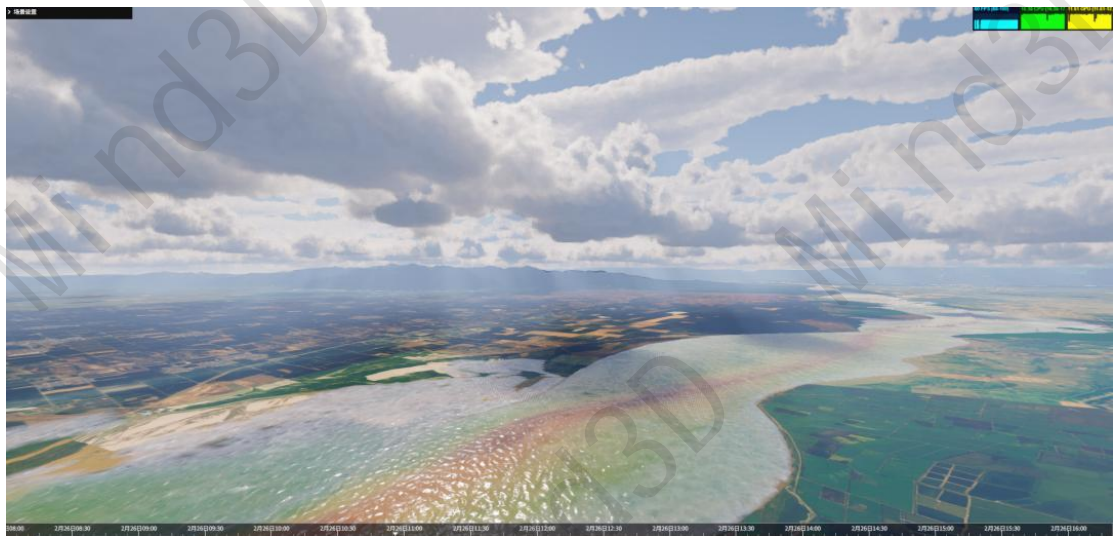


## 2. HDR 天空系统



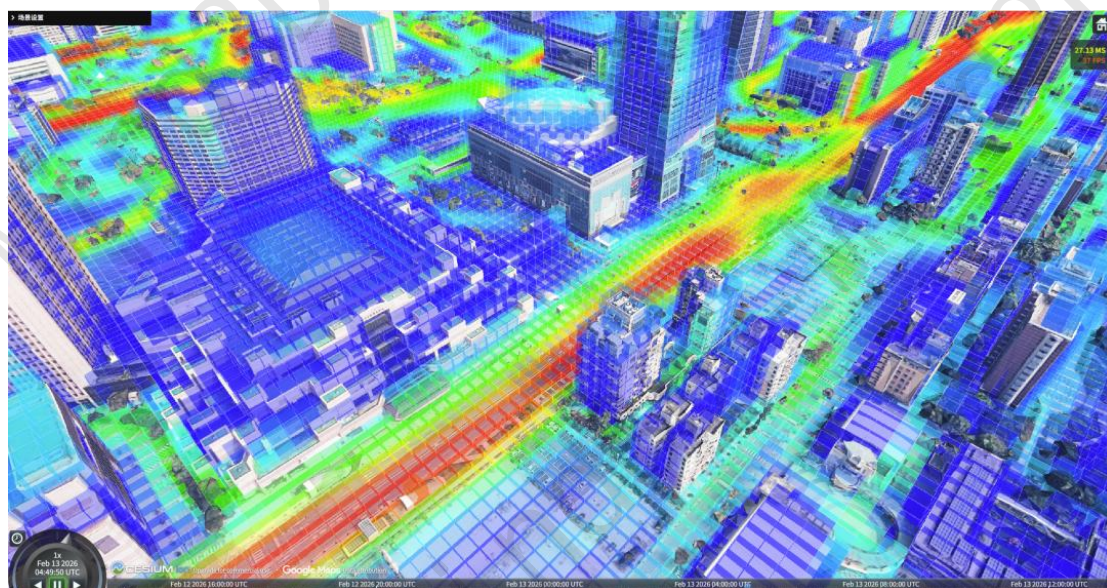
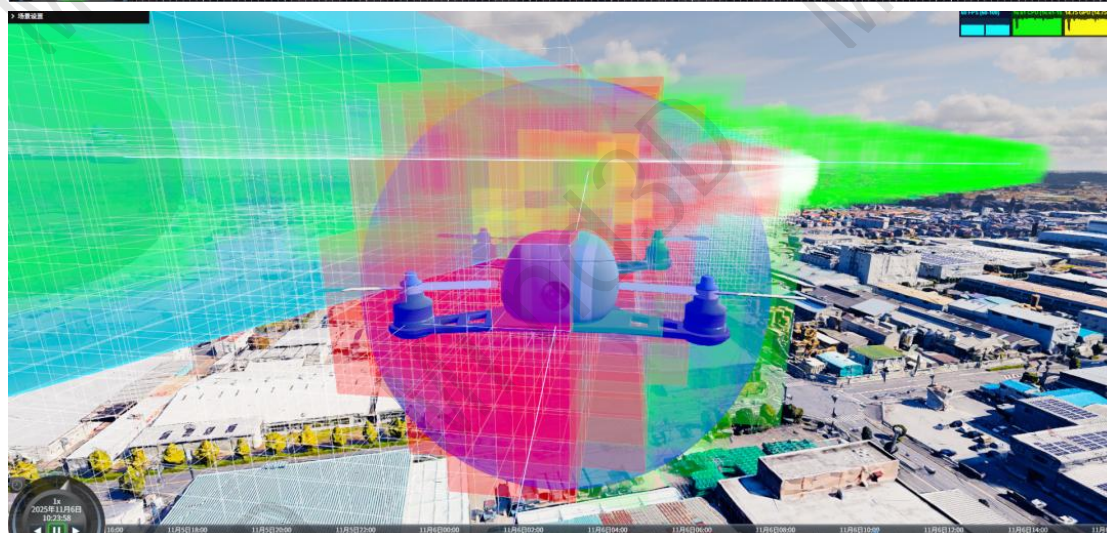
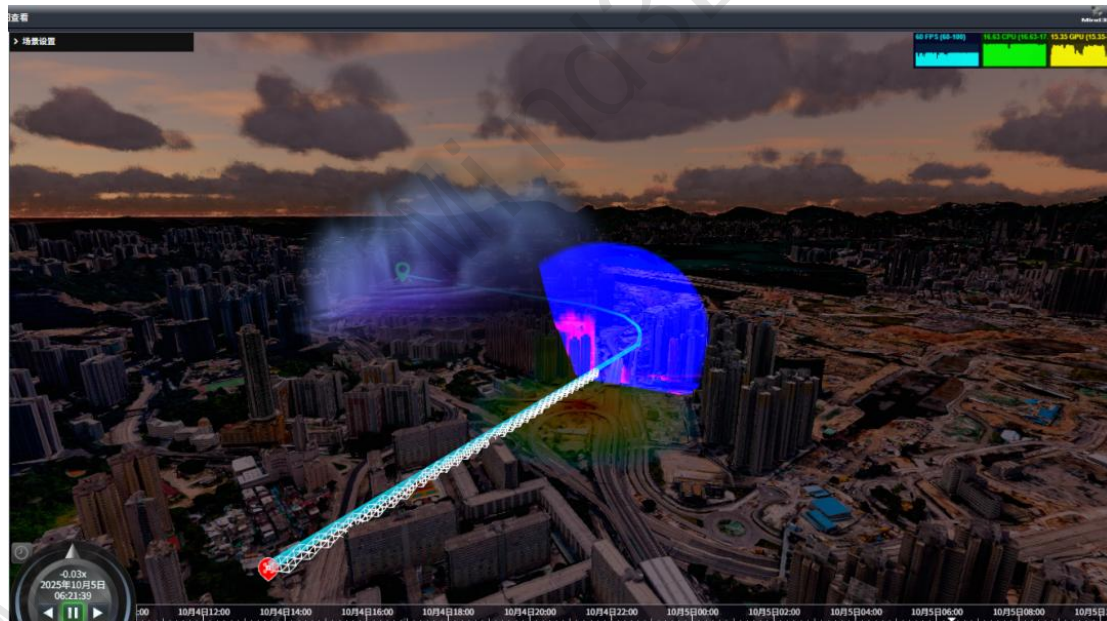


### 3. 天空系统 x 水利仿真河流应用





## 5. 天气系统 x 低空应用



### 三、全局光照系统：构建完整物理光照体系

全局光照系统，是高渲染体系中最核心的视觉基础。

在材质层面，系统构建了一套完整的物理材质体系：

- 支持标准 PBR (Physically Based Rendering) 渲染
- 兼容 Babylon 主流材质模型 (Metallic-Roughness 等)
- 支持 IBL (基于图像的光照) 与 HDR 环境贴图
- 支持 3D Tiles 模型自定义 PBR 材质扩展

在动态光照层面：

- 引入反射探针与折射探针，支持实时环境反馈
- 构建动态物理光照模型，使光照具备空间传播能力
- 支持基于屏幕空间的 GI (SSRT)，提取间接光并融合 PBR 材质
- 间接光照参与整体光照计算，使场景更加真实

在阴影体系上：

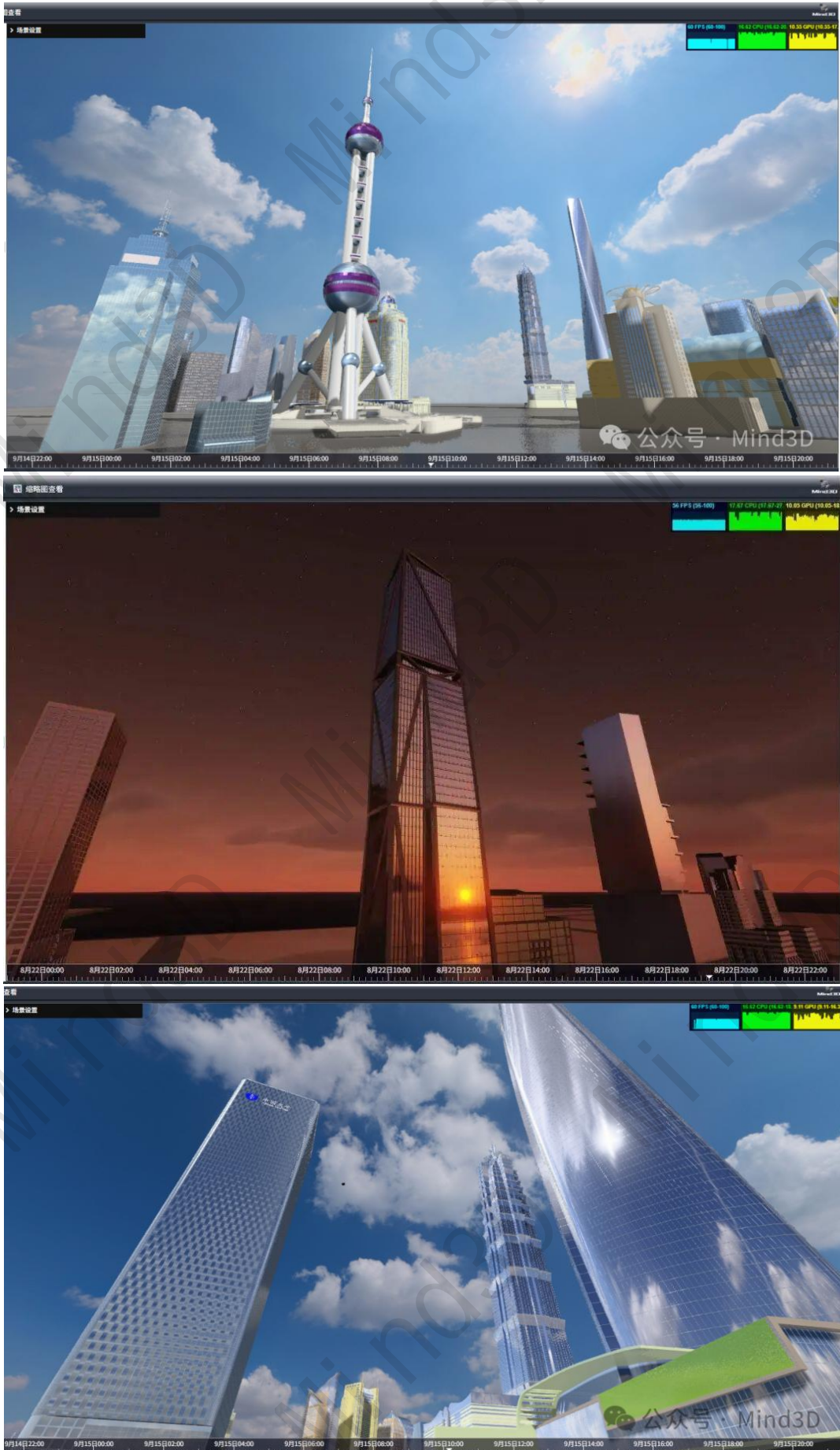
- 支持 CSM (级联阴影)，适用于大范围地形
- 支持 PCF 等高级软阴影算法，提升阴影质量

这一体系带来的核心变化是：光不再只是“照亮模型”，而是参与“构建空间”。

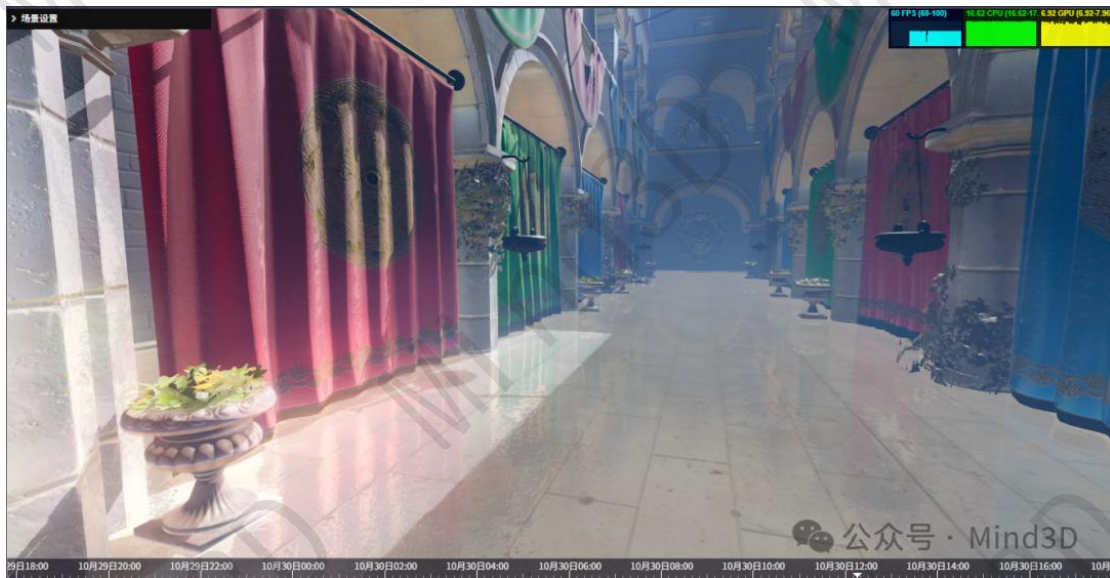
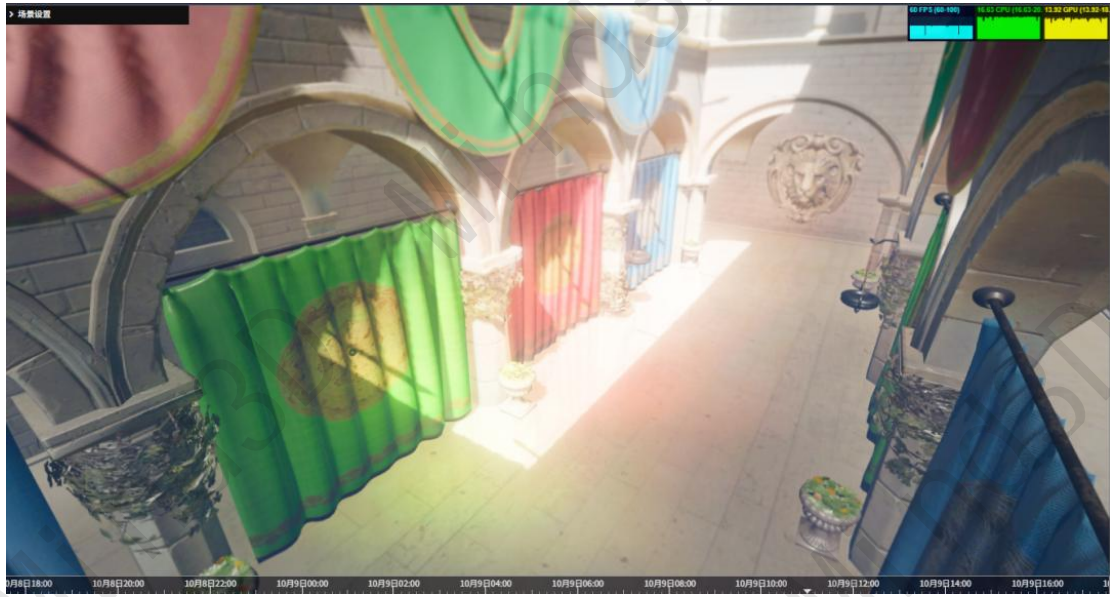
在 Cesium 大尺度场景中，这一点尤为关键：

- 山体、河谷、建筑形成真实空间层次
- 水体与地形产生正确光照关系
- 仿真结果与真实环境光照统一

# 1. 全新物理材质渲染



## 2. SSRT 全局光照+PBR 渲染





### 3. CSM+PCF 高级软阴影渲染



#### 4. 实时动态反射/折射探针



#### 四、动态植被系统：环境生态可视表达

在高渲染体系中，植被不再是静态资源，而是动态环境的一部分。

该系统基于参数化建模构建，具备以下能力：

- 支持植被的实时生成与自动贴地
- 支持大规模动态合批，保证性能稳定
- 支持风场驱动的整体动态效果
- 支持多风格渲染（写实 / 卡通）

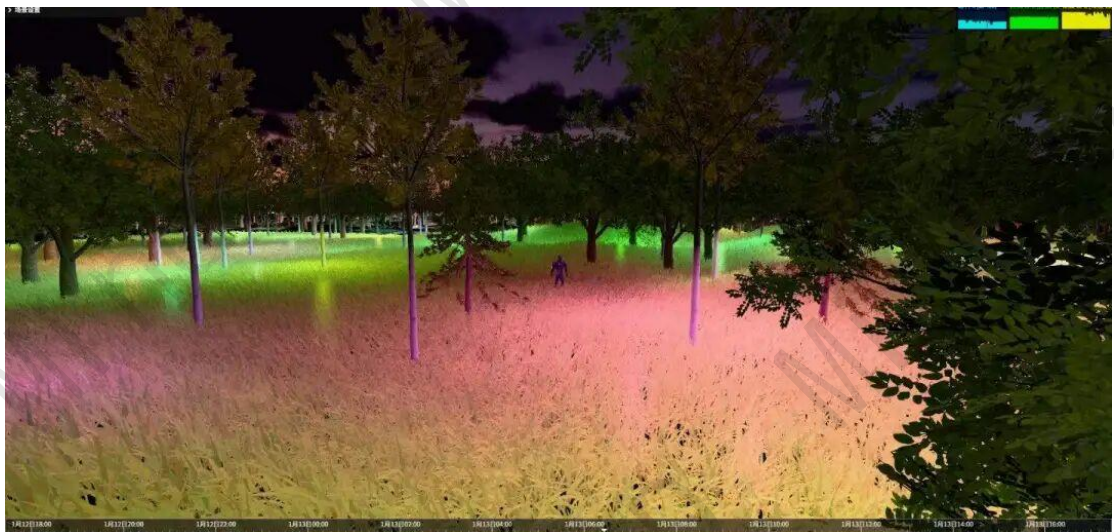
同时提供一套高质量草地渲染方案，使地表细节得到显著提升。

在 Cesium 场景中，这种能力的意义在于：

- 大范围流域生态环境具备统一动态
- 山区植被呈现整体“生命感”
- 场景从静态地形转变为动态生态空间

##### 1. HDR 天空系统 x 程序化植被 x 草地





## 2. 动态天气系统 x 程序化植被 x 草地



## 五、引擎融合应用：拓展 Cesium 能力边界

随着项目复杂度提升，单一引擎难以覆盖所有需求。

在实践中，逐渐形成了以 Cesium 为核心的引擎融合体系：

### Cesium + Three.js

- 支持 Three.js 项目无缝迁移
- 统一深度体系，无深度冲突问题
- 光照与后处理统一参与渲染流程
- 非多个 canvas 叠加渲染方案

### Cesium + Babylon.js

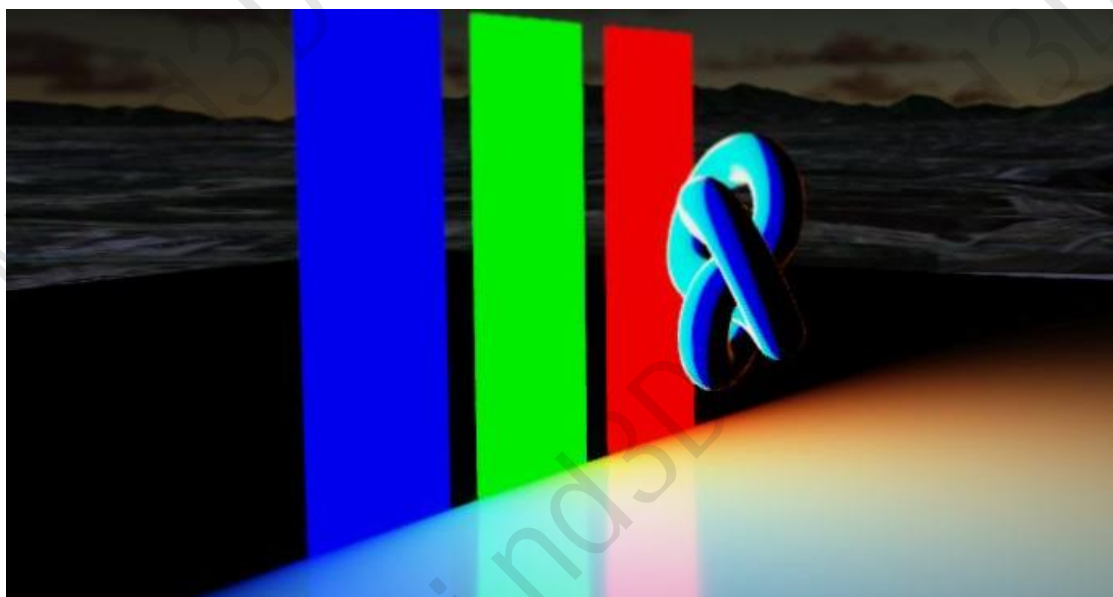
- 同样支持材质体系与渲染能力融合
- 保留 Babylon 在材质与光照上的优势
- 非多个 canvas 叠加渲染方案

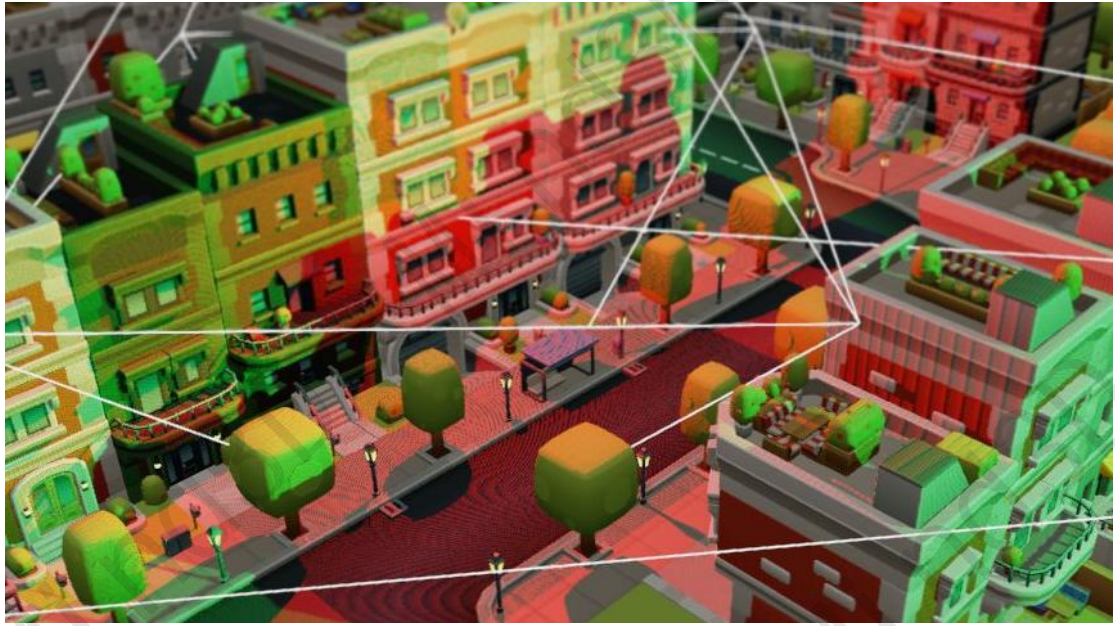
这种融合方式的核心价值在于：

- 保留 Cesium 的全球场景能力
- 引入更强的局部渲染能力
- 支持复杂仿真与高精度表现

最终形成一个多能力协同的三维平台。

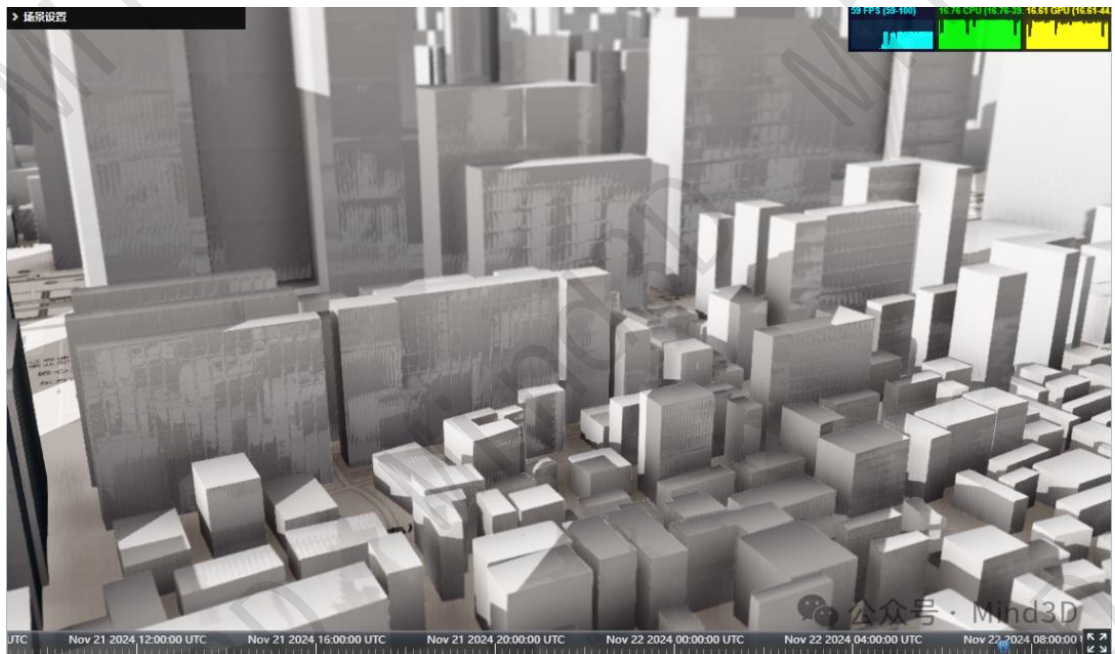
### 1. cesiumjs+threejs 引擎融合





## 2. cesiumjs+babylonjs 引擎融合 (PBR+SSAO+RSMGI)





## 六、体积光照系统：空间多维度表达

体积光照系统使 Cesium 场景首次具备“空间介质”的表达能力。

基于屏幕空间与 ShadowMap 的结合 (SSRT)，实现：

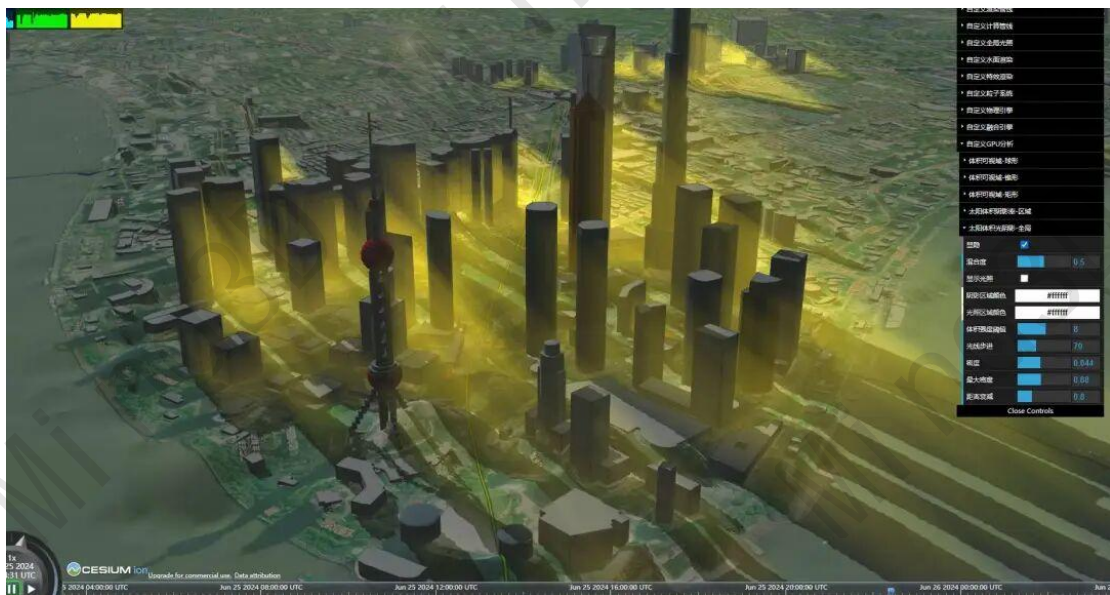
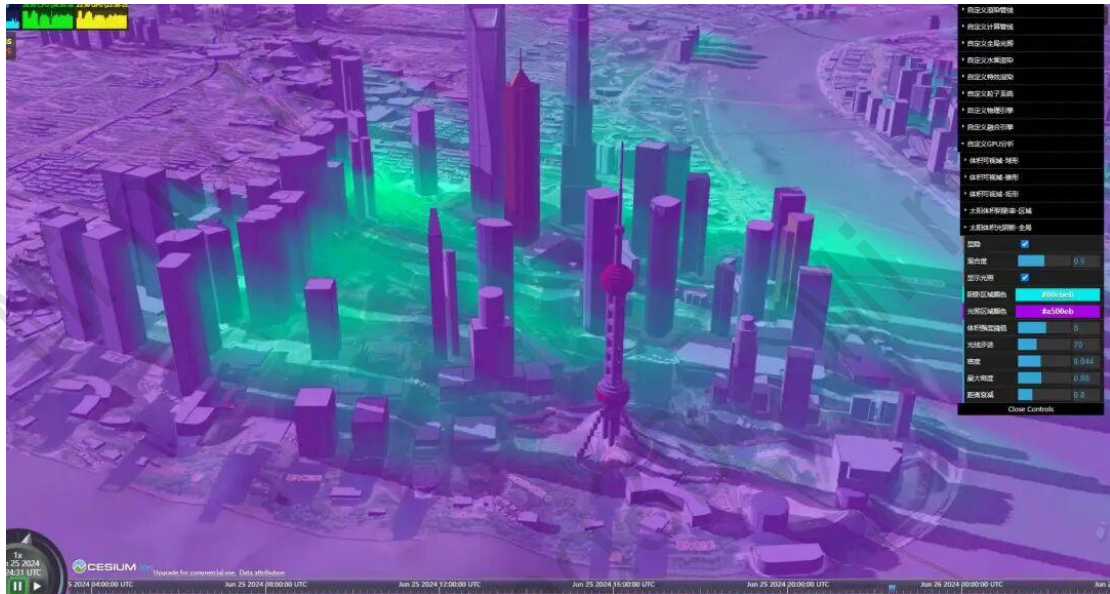
- 真实体积光（光束）效果
- 体积雾与空间密度表达
- 光在空间中的传播与衰减

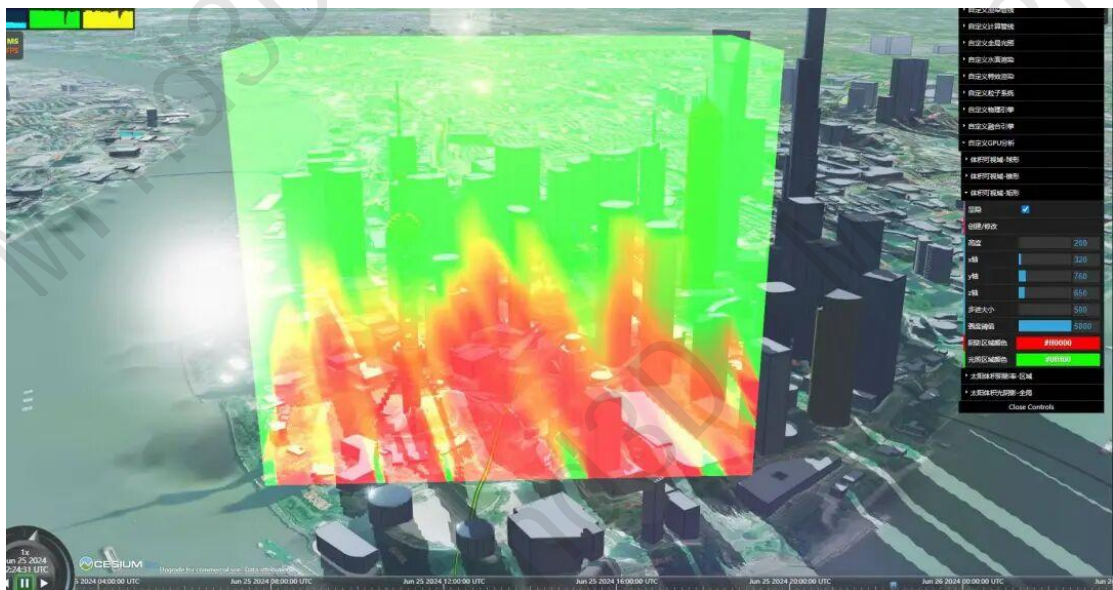
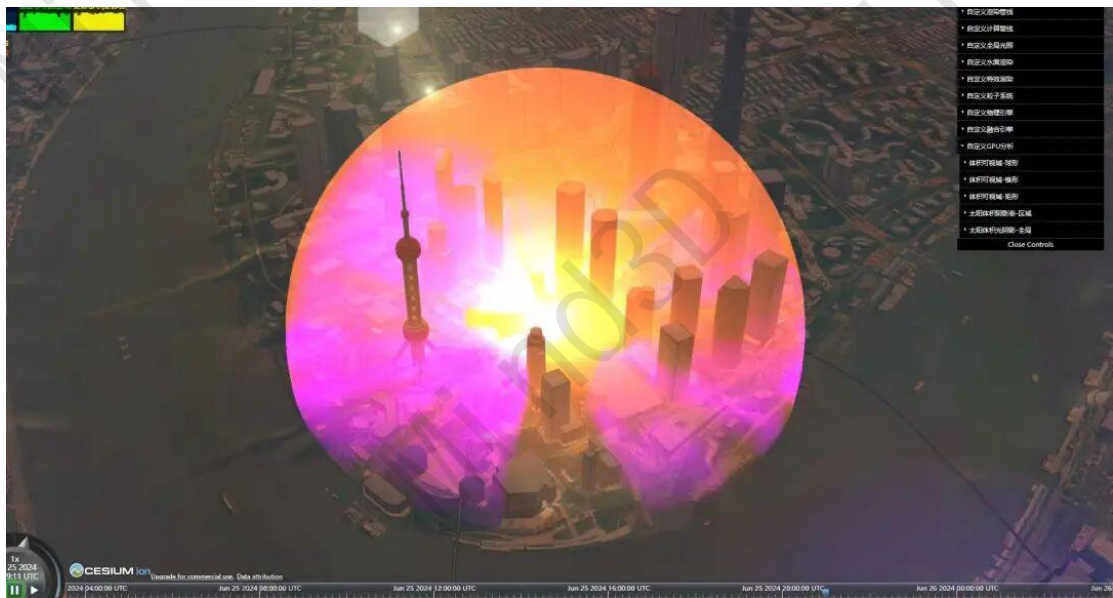
这种能力不仅用于视觉增强，还可以支持分析类应用：

- 水汽与湿度分布表达
- 烟尘扩散可视化
- 空间能见度分析

场景从“表面表达”，升级为“空间表达”。

### 1. 体积光照应用





## 2. 融合建筑风场的物理体积雾应用



## 七、高斯融合：多种三维数据表达方式

区别于 Cesium 3D Tiles 体系的瓦片流高斯模型渲染，该高斯融合主要展示集成比较优秀的开源高斯泼溅插件渲染能力。

该系统支持：

- 原始 PLY / Gaussian Splat 数据
- 多种压缩格式 (KSplat、SPZ、SOG、RAD 等)
- 支持光照与阴影参与渲染
- 支持数据级分析与表达

其核心能力来源于高斯点云渲染体系（如 Spark.js），并进行了工程化移植与扩展。相比传统模型：

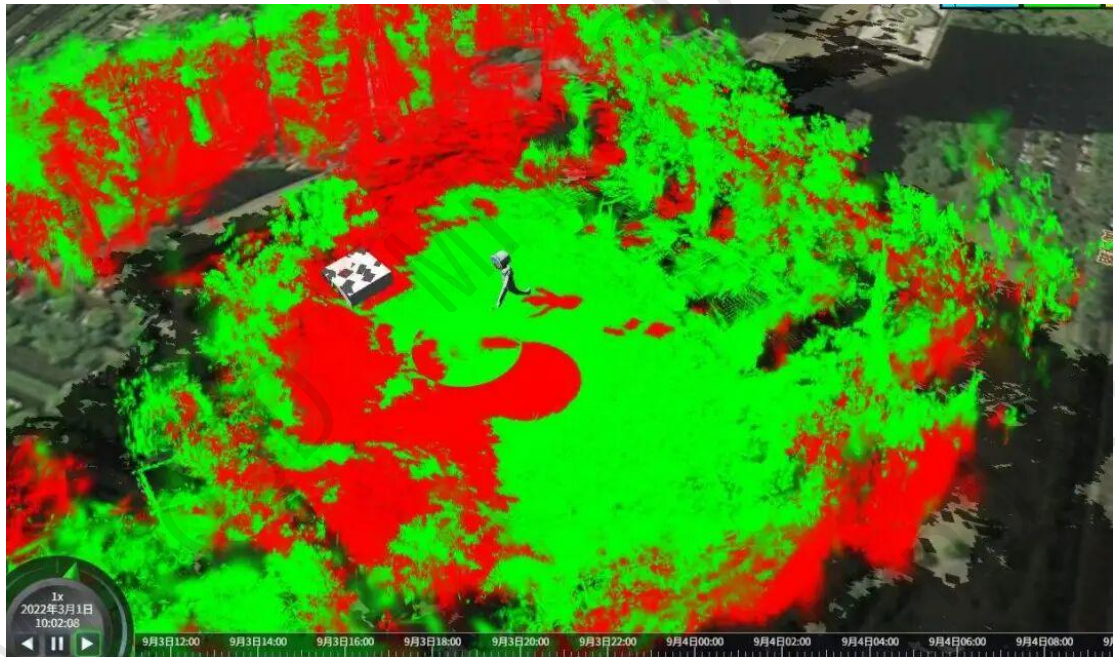
- 表达更加连续
- 细节更加丰富
- 更适合实景与复杂结构

在应用中：

- 可用于实景三维增强表达
- 可用于灾害现场快速重建
- 可用于高精度空间分析

高斯融合，正在成为三维表达的重要补充路径。





从整体来看，2026 年基于 CesiumJS 的高渲染体系，已经完成了一次从“能力补强”到“体系重构”的跨越。

它不再只是对原有渲染能力的局部增强，而是围绕底层管线、光照模型、环境系统以及多源融合，构建出一套完整的三维环境表达框架。

在这一体系中：

- 渲染不再只是显示结果，而是参与空间构建
- 光照不再只是视觉效果，而是表达物理关系
- 环境不再只是背景，而是驱动场景变化的核心
- 数据不再是简单叠加，而是融入统一空间语境

CesiumJS 的角色，也因此发生了根本性变化：

从“承载地理数据的三维地球引擎”，逐步演进为“面向行业应用的实时环境表达平台”。

对于水利、低空经济、地灾应急等领域而言，这种转变的意义非常明确：

三维系统不再只是“展示工具”，而是成为理解空间、分析过程、支撑决策的重要载体。