

陈雨璇, 王诗怡, 廖轶鹏, 等. 基于地基云图的三维体素积云建模方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(10): 152-164. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.012

CHEN Yuxuan, WANG Shiyi, LIAO Yipeng, et al. Research on 3D voxel-based cumulus cloud modeling method using ground-based cloud images[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(10): 152-164. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.012

# 基于地基云图的三维体素积云建模方法研究

陈雨璇<sup>1,2</sup>, 王诗怡<sup>1,2</sup>, 廖轶鹏<sup>1,2</sup>, 黎东洲<sup>1,2</sup>, 高瑾瑾<sup>1,2</sup>

(1. 水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:**【目的】积云的快速生成与移动是导致光伏发电输出功率波动的主要气象因素, 其对太阳辐射度的遮蔽效应显著影响光伏系统的运行稳定性和功率预测精度。然而, 传统基于二维图像的积云建模方法难以反映云体在垂直方向的结构变化, 缺乏对云基高度、云团厚度及内部粒子分布等关键物理参数的有效表达, 难以满足光伏应用场景下对高分辨率、实时性和物理一致性的建模需求。【方法】为此, 提出一种基于地基云图的三维体素积云建模方法, 通过图像预处理与空间配准实现积云区域的地理定位, 提出面向积云对象的云基高度和云团厚度自动提取方法, 并引入云粒子密度参数, 构建具有物理约束特征的体素表达模型, 结合 GPU 渲染管线实现积云外形与内部特征的高效建模与可视化。【结果】试验结果表明, 所提方法计算的云基高度与遥感影像反演结果的相对误差在 5% 以内, 云粒子密度分布与 CloudSat 剖面观测一致, GPU 方法在建模效率和渲染性能方面优于传统方法, 三维场景交互帧率稳定。【结论】研究表明, 该方法可实现积云的快速重建与高效可视化, 验证了基于地基云图提取关键参数的可行性和准确性, 为光伏功率预测提供了有效的模型与数据支撑。

**关键词:** 地基云图; 三维积云建模; 体素建模; 云粒子密度; GPU 渲染; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.10.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)10-0152-13



## Research on 3D voxel-based cumulus cloud modeling method using ground-based cloud images

CHEN Yuxuan<sup>1,2</sup>, WANG Shiyi<sup>1,2</sup>, LIAO Yipeng<sup>1,2</sup>, LI Dongzhou<sup>1,2</sup>, GAO Jinjin<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Ministry of Transport, National Energy Administration, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 2. Key Laboratory of Taihu Basin Water Resources Management, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] The rapid formation and movement of cumulus clouds are the main meteorological factors causing fluctuations in photovoltaic (PV) power output, and their shading effects on solar irradiance significantly affect the operational stability of PV systems and the accuracy of power prediction. However, traditional cumulus cloud modeling method based on 2D

收稿日期: 2025-04-20; 修回日期: 2025-06-20; 录用日期: 2025-07-02; 网络出版日期: 2025-07-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3210800); 广西科技重大专项(桂科 AA23062053); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y124004); 江苏省水利科技项目(2023002)

作者简介: 陈雨璇(1995—), 女, 工程师, 博士, 主要从事三维地理信息系统与智慧水利研究。E-mail: yxchen@nhri.cn

通信作者: 廖轶鹏(1989—), 男, 工程师, 博士, 主要从事城市水力学研究。E-mail: ypliao@nhri.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

images fail to reflect the structural variation of clouds in the vertical direction and lack effective expression of key physical parameters such as cloud base height, cloud thickness, and internal particle distribution, making it difficult to meet the modeling requirements for high resolution, real-time performance, and physical consistency in PV applications. [Methods] To address this, a 3D voxel-based cumulus cloud modeling method using ground-based cloud images was proposed. The geographic positioning of cumulus regions was achieved through image preprocessing and spatial registration. An automatic extraction method for cloud base height and cloud thickness for cumulus clouds was proposed, and a cloud particle density parameter was introduced to construct a voxel expression model with physical constraints. Combined with a GPU rendering pipeline, efficient modeling and visualization of cumulus cloud morphology and internal characteristics were realized. [Results] The experimental result showed that the calculated cloud base height had a relative error within 5% compared to remote sensing inversion result. The cloud particle density distribution was consistent with CloudSat profile observations. The GPU-based method outperformed traditional method in modeling efficiency and rendering performance, maintaining stable frame rates in 3D scene interaction. [Conclusion] The findings demonstrate that this method can achieve rapid reconstruction and efficient visualization of cumulus clouds, verifying the feasibility and accuracy of extracting key parameters based on ground-based cloud images and providing an effective model and data support for PV power prediction.

**Keywords:** ground-based cloud image; 3D cumulus cloud modeling; voxel modeling; cloud particle density; GPU rendering; influencing factors

## 0 引言

光伏发电作为清洁能源的重要形式,其输出功率受太阳辐照度变化显著影响。在国家加快推进“双碳”战略背景下,水利高质量发展与能源结构优化密切相关,良好的水安全保障为清洁能源可持续利用提供了重要支撑<sup>[1-2]</sup>。在晴空条件下,低空积云的快速生成与移动将导致地表太阳辐射强度突降,进而引发电力发电功率的随机性波动,对电力系统的稳定运行构成挑战。研究表明,积云是引起光伏输出间歇性和不确定性的关键气象因素之一<sup>[3]</sup>。因此,构建准确的三维积云模型,从而准确量化评价积云对太阳辐射的遮蔽效应,对于提升光伏发电功率预测的准确性具有重要意义<sup>[4]</sup>。

近年来,地基全天空成像仪(Total Sky Imager, TSI)因具备较高的时间和空间分辨率,被广泛应用于云图数据获取与分析<sup>[5]</sup>。基于TSI采集的图像,研究人员开展了云层分布识别与运动趋势预测的相关研究<sup>[6-8]</sup>。此外,部分研究尝试融合雷达、卫星遥感等多源观测数据,以估算云基高度并重建三维云体结构<sup>[9]</sup>。然而,现有方法多以二维图像为基础,忽略了云体在垂直方向上的结构特征,缺乏对积云厚度、积云密度等关键参数的建模,难以准确评估太阳遮蔽强度与辐照度衰减量。

在三维积云建模方面,当前方法主要包括基于物理机制的数值模拟方法和以视觉重建为导向的启发式建模方法。前者以流体力学、热力学等基本方程为基础,模拟积云的生成与演化过程<sup>[10]</sup>,虽然具备较强

的物理表达能力,但计算成本高,难以满足实时性需求;后者侧重云的形态还原与可视化表达,方法包括噪声建模<sup>[11]</sup>、粒子系统<sup>[12]</sup>、纹理映射<sup>[13]</sup>和体渲染方法<sup>[14-15]</sup>等,适用于快速构建和渲染复杂云场景。然而,这类方法多以随机过程生成云体,难以准确控制云的位置、体积和内部结构,且不能有效融合真实观测数据,难以满足光伏发电场景下的实时性与准确性要求。为解决上述问题,学者探索了图像驱动的三维重建方法。如YUAN等<sup>[16]</sup>提出基于图像对称性的积云外形估算方法,但未能有效获取云体的实际空间位置与结构信息;ZHANG等<sup>[17]</sup>利用遥感影像开展大尺度积云建模,尽管在表达能力上取得一定进展,但其时间分辨率与空间分辨率难以满足光伏场站级别的精细化需求。

积云种类多样,不同云型在尺度结构、垂直发展高度及遮蔽效应方面存在显著差异。为提升模型的一致性与适用性,本文聚焦于典型的浅积云建模研究。该类积云通常在晴空条件下生成,云基高度一般小于2 000 m,具有底部平坦、顶部呈圆拱状、边界清晰等特征,是影响晴天太阳辐照度变化的主要云状<sup>[18]</sup>。因此,本文所提出的建模参数与方法均以此类典型积云为研究对象,暂不涵盖积雨云或结构更复杂的深对流云型。

综上所述,本文针对现有三维积云建模方法在光伏应用场景中存在的空间分辨率不足、实时性欠缺及物理参数缺失等问题,提出一种基于地基云图的三维体素建模方法。主要创新点如下:(1)提出一种基于地基云图的积云建模参数计算方法,以地基云图表达

的图像信息为基础, 结合遥感影像的空间位置信息, 逐积云对象计算云团空间位置、云基高度和云团厚度三个关键参数, 为构建真实三维地理场景中的三维积云模型提供空间参考基础。(2) 提出一种基于 GPU 的三维体素积云建模方法, 通过在 GPU 渲染管线中定义一种顾及云粒子密度的体素作为基本几何单元, 实现高效的三维积云外部形态特征模拟和内部云粒子密度值计算, 从而构建与真实积云特性相近的三维体素积云模型。在深入推进水利事业高质量发展的指导下<sup>[19]</sup>, 针对典型积云的三维形态特征开展精细化建模, 有助于提升光伏功率预测水平, 支撑水利与能源多场景的协同优化与高效调度。

## 1 基于地基云图的积云建模参数计算

### 1.1 地基云图预处理

地基云图是一种通过配备鱼镜头的全天空成像仪自下而上采集的图像, 图像存在一定的畸变, 导致直接根据图像构建的三维积云模型不准确<sup>[20]</sup>。此外, 图像中出现的强光点及其周围曝光过度的晴空像素

点, 严重影响了后续的积云识别和计算<sup>[21]</sup>。因此, 本文在建模前对原始图像进行三步预处理, 包括: 强光点修复、畸变校正与云状区域提取, 如图 1 所示。首先根据成像时间计算太阳参数识别强光点, 得到图 1(a)中的绿色标识区域, 再修复强光点及周围过度曝光的像素点<sup>[22]</sup>, 结果如图 1(b)所示。第二步采用球面透视投影方法<sup>[23]</sup>将鱼眼图像中有效图像部分校正成正方形图像, 最后根据局部阈值方法<sup>[24]</sup>分割图像, 得到如图 1(d)所示的云团区域。

### 1.2 积云区域的地理位置计算

地基云图是一种无地理空间参考的彩色图像, 无法直接从该图像中获取积云区域的地理位置信息。因此, 本文首先利用遥感影像的地理位置信息对地基云图进行辅助定位, 在三维地理空间中确定了地基云图中心点的位置, 并以该点为原点建立局部坐标系, 如图 2 所示。在此基础上, 对地基云图与同一时刻下的遥感影像的空间信息进行匹配, 通过仿射变换实现图像中的云像素点从像素坐标系到三维地理空间中局部坐标系的映射。

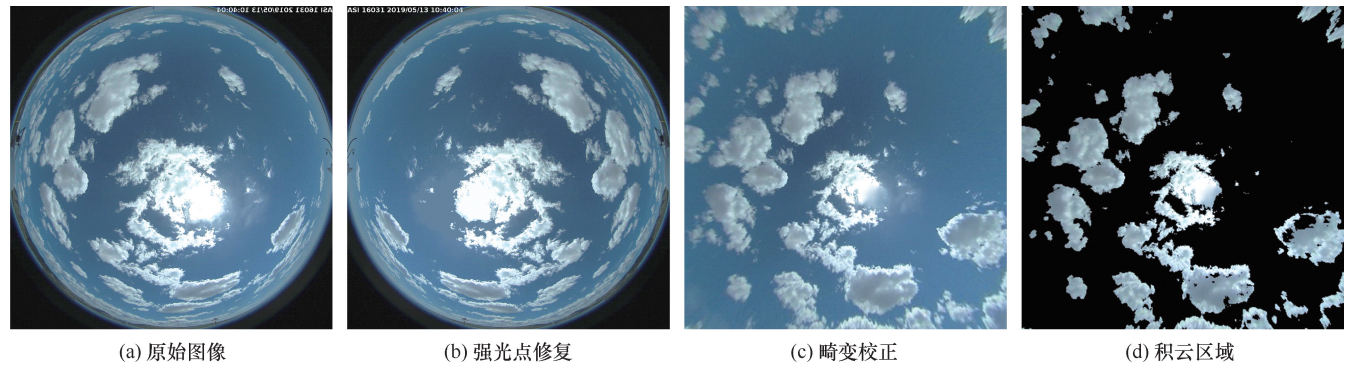


图 1 地基云图预处理流程

Fig. 1 Workflow of ground-based cloud image preprocessing

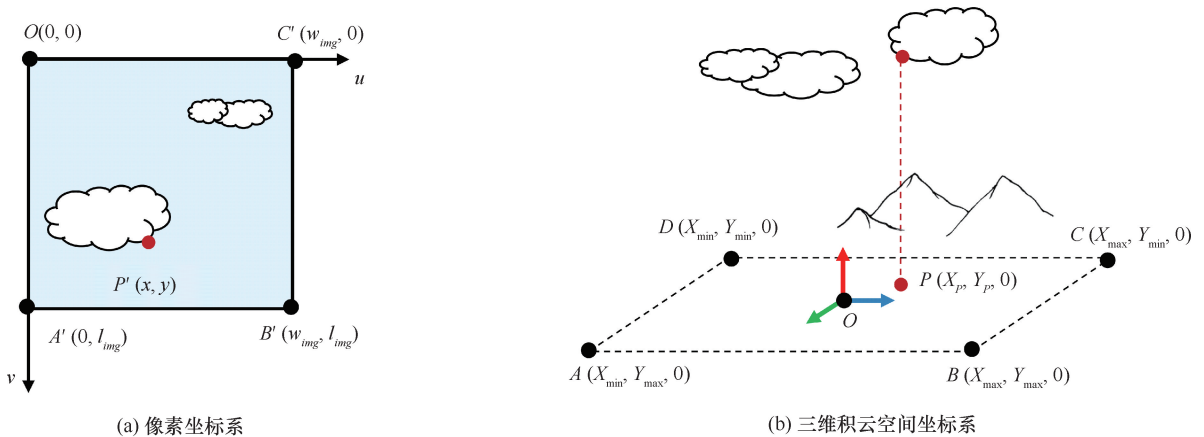


图 2 像素坐标系下的地基云图到三维积云空间坐标系的映射示意

Fig. 2 Schematic diagram of mapping from ground-based cloud image in pixel coordinate system to 3D cumulus cloud in spatial coordinate system

积云区域的地理位置计算方法主要分为三个步骤。

步骤一, 在像素坐标系下计算地基云图的图幅范围, 如图 2(a) 所示, 该范围定义为由原点  $O$ 、 $A'(0, l_{img})$ 、 $B'(w_{img}, l_{img})$ 、 $C'(w_{img}, 0)$  共同组成的矩形区域, 记为  $R_{img}$ 。其中,  $w_{img}$ 、 $l_{img}$  分别为地基云图的图幅宽度和长度的像素数。

步骤二, 检索与地基云图成像时间一致的 Landsat 8 影像, 将已校正的地基云图中提取的积云轮廓与 Landsat 8 影像中的积云进行位置匹配, 确定地基云图在三维积云空间坐标系中的图幅范围。如图 2(b) 所示, 该范围是积云在  $O$ - $XY$  平面上的垂直投影, 此时  $Z = 0$ , 定义为由  $A(X_{min}, Y_{max}, 0)$ 、 $B(X_{max}, Y_{max}, 0)$ 、 $C(X_{max}, Y_{min}, 0)$ 、 $D(X_{min}, Y_{min}, 0)$  共同组成的矩形区域, 记为  $R_{world}$ 。

步骤三, 根据  $R_{img}$ 、 $R_{world}$  建立地基云图中的云像素由像素坐标系下的坐标  $(x, y)$  到三维积云空间坐标系下的坐标  $(X, Y)$  的仿射变换方程, 具体公式为

$$(X, Y) = \left( \frac{X_{max} - X_{min}}{l_{img}} \times x + X_{min}, -\frac{Y_{max} - Y_{min}}{w_{img}} \times y + Y_{max} \right) \quad (1)$$

式中,  $X_{max}$ 、 $X_{min}$  分别为三维积云空间坐标系下的地基云图所示区域的在  $X$  轴上的最大值和最小值;  $Y_{max}$ 、 $Y_{min}$  分别为  $Y$  轴上的最大值和最小值;  $w_{img}$ 、 $l_{img}$  分别为地基云图的图幅宽度和长度。

### 1.3 建模参数计算

根据积云的形态特征, 本文定义了一种云底平滑、云顶连续起伏的三维积云模型, 计算云基高度和云团厚度两个关键建模参数。云基高度是指云底距离地面的垂直距离, 直接影响地表形成的积云阴影区域范围。云团厚度是积云在垂直方向上的形态特征表达, 直接影响受积云遮挡造成的太阳辐射衰减程度。

#### 1.3.1 云基高度计算

本文以每个积云为对象, 计算云基高度 (CBH)。如图 3 所示, 积云底部中心点  $P'$  与其地面垂直投影点  $P$  之间的垂直距离即为云基高度。考虑到积云底部形态相对平整, 本文以其底部中心点的高度作为该对象整体的云基高度。

在全天空成像仪中心点为原点的局部坐标系下, 云基高度 (CBH) 的计算主要涉及云团高度角 ( $alt$ ) 与方位角 ( $az$ ) 两个参数。如图 4 所示, 云团高度角 ( $alt$ ) 是全天空成像仪观测该积云的方向线与地面的夹角; 云团方位角 ( $az$ ) 是从正北起沿地平线顺时针至云团地面投影的夹角。

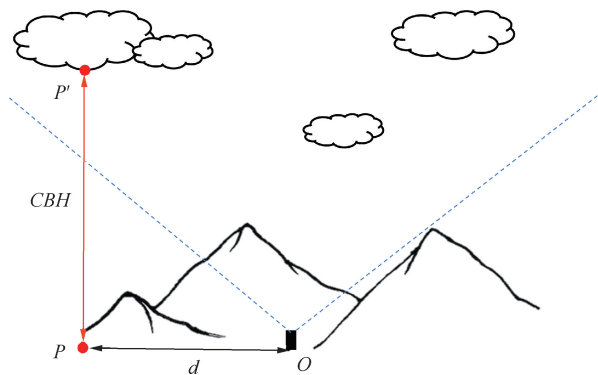


图 3 全天空成像仪成像范围

Fig. 3 Imaging range of total sky imager

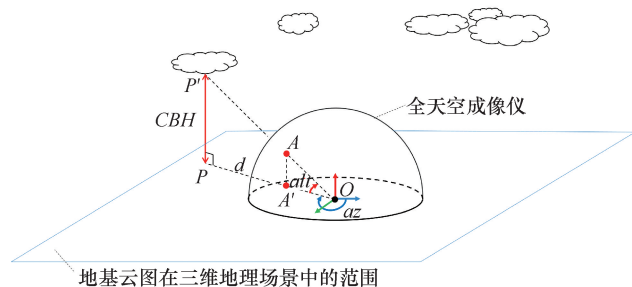


图 4 云基高度计算原理

Fig. 4 Principle of cloud base height calculation

首先根据云团在图像中的位置反演其高度角与方位角; 再结合云团在地面投影点  $P$  与成像仪中心点  $O$  之间的水平距离  $d$ , 通过几何关系计算得出垂直方向的云基高度 (CBH), 具体步骤如下。

步骤一, 在三维积云空间坐标系下, 计算积云底部中心点  $P'$  在地表的投影点  $P$  与原点  $O$  之间的距离  $d$ , 计算公式为

$$d = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (2)$$

步骤二, 在像素坐标系下, 根据地基云图中的积云中心点坐标计算云团方位角  $az_{cloud}$ 。地基云图的中心点坐标  $O(x_0, y_0)$ 、积云对象云底中心点坐标  $A'(x, y)$  计算云团方位角  $az_{cloud}$ , 计算公式为

$$az_{cloud} = \tan^{-1} \frac{x - x_0}{y_0 - y} \quad (3)$$

步骤三, 在像素坐标系下, 根据两点距离公式计算  $O(x_0, y_0)$ 、 $A'(x, y)$  两点之间的长度  $r$ , 并结合云团方位角  $az_{cloud}$  计算云团高度角  $alt_{cloud}$ , 计算公式为

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (4)$$

$$alt_{cloud} = \cos^{-1} \frac{x - x_0}{r \times \sin(az_{cloud})} \quad (5)$$

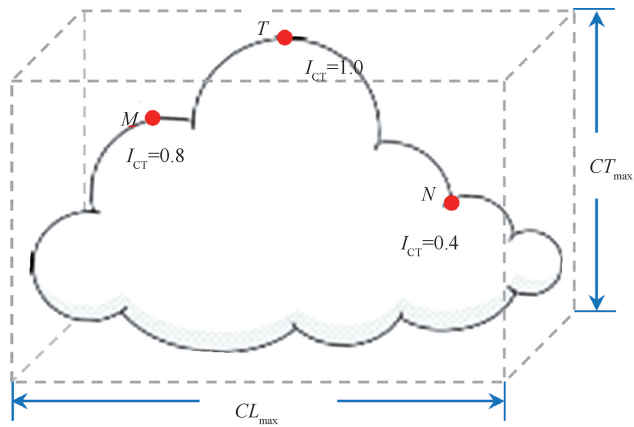
步骤四, 在三维积云空间坐标系下, 根据  $O$ 、 $P$  距离  $d$  和云团高度角  $alt_{cloud}$  计算云基高度  $CBH$ , 计算公式为

$$CBH = d \times \tan(alt_{cloud}) \quad (6)$$

### 1.3.2 云团厚度计算

积云在垂直方向上具有明显的厚度特征, 已有研究<sup>[25]</sup>表明, 积云的垂直范围受到不稳定层的深度控制, 形成了垂直范围与水平范围相当的形态特征。

对此, 本文考虑通过计算积云的水平范围来计算积云的最大厚度, 并定义一种取值范围在 0~1 之间的积云厚度指数  $I_{CT}$ , 用来描述积云厚度起伏情况。如图 5 所示, 积云在水平方向上的最大范围为  $CL_{max}$ , 在垂直方向上的积云最大厚度为  $CT_{max}$ , 描述垂直方向上的厚度起伏的积云厚度指数为  $I_{CT}$ 。图 5 中  $T$  点表示积云最高的点, 即该点的积云厚度最大,  $I_{CT} = 1.0$ 。而  $M$  点和  $N$  点所表示的真实积云厚度则可以根据对应的积云厚度指数和积云最大厚度计算得到。



$CL_{max}$ : 积云水平范围;  $CT_{max}$ : 积云最大厚度;  $I_{CT}$ : 积云厚度指数

图 5 积云厚度示意

Fig. 5 Schematic diagram of cumulus cloud thickness

此外, 云团厚度是影响太阳辐射衰减的最主要因素, 光线受到积云遮挡造成的衰减是线性的<sup>[26]</sup>, 光线穿过的介质越厚太阳辐射衰减越大, 到达地表的太阳辐射度越少, 太阳辐射度水平造成了地基云图中像素亮度的变化。

因此, 本文提出了一种基于地基云图亮度信息的云团厚度计算方法。对于每一个积云对象, 首先根据积云在水平方向上的空间范围计算积云最大厚度, 再根据地基云图的像素亮度值计算积云厚度指数, 最后根据积云最大厚度和积云厚度指数实现三维积云空间坐标系下的积云云团厚度计算。

基于地基云图亮度信息的云团厚度计算方法主要分为三个步骤。

步骤一, 积云最大厚度  $CT_{max}$  计算。

积云最大厚度受到积云水平范围的影响, 积云水平范围与垂直厚度的定量关系<sup>[25]</sup>, 即积云在水平方向上的最大宽度约为垂直方向上最大厚度的 0.85 倍。该关系基于典型浅积云的观测结果建立, 适用于本文所研究的晴空条件下浅积云类型, 具体计算公式为

$$\frac{CL_{max}}{CT_{max}} = \frac{8}{3\pi} \approx 0.85 \quad (7)$$

在此基础上, 计算该积云对象在三维地理场景中的最大厚度  $CT_{max}$ , 计算公式为

$$CT_{max} = \frac{CL_{max}}{0.85} \quad (8)$$

步骤二, 基于像素亮度值的积云厚度指数  $I_{CT}$  计算。

积云对太阳辐射的遮蔽效应会导致地基云图中云像素亮度显著降低。为提取亮度信息, 本文将云图由 RGB 模式转换至 HSL 色彩空间, 并提取其中 L 通道亮度值。基于 LI 等<sup>[27]</sup>提出的亮度衰减模型, 采用云像素与晴空像素亮度比值, 构建反映云团厚度变化的无量纲厚度指数  $I_{CT}$ , 用于量化各像素对应的相对云厚度。计算公式为

$$\frac{L_{cloud}}{L_{sky}} = e^{-\mu T} \quad (9)$$

式中,  $L_{sky}$  为晴空像素的亮度值;  $L_{cloud}$  为云像素的亮度值;  $\mu$  为光在介质中的线性衰减系数;  $T$  为亮度值。

根据公式(9), 推导出云团厚度值  $T$  与积云像素亮度值  $L_{cloud}$  和晴空像素亮度值  $L_{sky}$  之间的关系。计算公式为

$$T = -\frac{1}{\mu} \ln \frac{L_{cloud}}{L_{sky}} \quad (10)$$

对于积云对象的每个像素, 根据公式(10)计算  $T$ , 通过遍历  $T$  值得到厚度最大值  $T_{max}$  和最小值  $T_{min}$ 。在此基础上, 通过最大值最小值归一化方法, 计算归一化的积云厚度指数  $I_{CT}$ , 该指数的范围在 0 到 1 之间。计算公式为

$$I_{CT} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (11)$$

步骤三, 根据最大积云厚度  $CT_{max}$  和积云厚度指数  $I_{CT}$  计算云团厚度  $CT$ 。

根据步骤一计算的积云最大厚度  $CT_{max}$  以及步骤二计算积云厚度指数  $I_{CT}$ , 计算每个像素对应的积云

厚度值  $CT$ 。计算公式为

$$CT = CT_{\max} \times I_{CT} \quad (12)$$

## 2 基于 GPU 的三维体素积云建模方法

目前三维建模通常采用基于网格或曲面的方法来模拟目标对象的外部轮廓, 虽然可实现较为精细的形态还原, 但其算法复杂度高, 且难以描述模型内部结构特征, 难以满足积云体积建模和物理特性分析的需求。因此, 本文引入了三维模型体素化的思想。体素是三维空间中的最小几何单元, 体素化是以体素为基本单位对目标进行三维离散建模的方法, 其最大优势在于可同时描述目标对象的外部形态与内部结构特征<sup>[28]</sup>。基于体素构建三维积云模型, 不仅显著降低计算复杂度, 而且能够完整表达云体的边界形态与内部属性。此外, 图形处理器 (GPU) 具备并行图形流水线处理能力, 可有效提升大规模体素数据的渲染与建模效率。综上, 本文提出了一种基于 GPU 的三维积云体素建模方法。

### 2.1 顾及云粒子密度的体素计算方法

在三维积云空间坐标系中, 本文首先定义了一种固定尺寸的立方体体素作为体素积云模型的基本建模单元, 如图 6 所示。

本文将构建三维积云的体素定义为一种边长为  $L_{\text{voxel}}$  的立方体,  $L_{\text{voxel}}$  的计算公式为

$$L_{\text{voxel}} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\text{img\_length}} \quad (13)$$

式中,  $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$  为三维积云空间坐标系下地基云图的空间范围在  $X$  轴方向上的最大值、最小值;  $\text{img\_length}$  为校正后的地基云图的图幅长度。

体素在三维积云空间坐标系中的位置由其中心点坐标  $(x, y, z)$  决定,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的取值范围为

$$\begin{cases} X_{\min} \leq x \leq X_{\max} \\ Y_{\min} \leq y \leq Y_{\max} \\ 0 \leq z \leq Z_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

该模型不仅能够还原积云外部轮廓, 还可通过体素填充的方式构建其内部结构, 为进一步分析积云微观特性提供基础数据支持。

考虑到云滴数浓度对积云反照率及太阳辐射传输的显著影响, 本文引入云粒子密度参数, 作为描述体素中云滴数浓度的无量纲指标。参考已有研

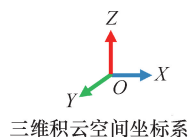


图 6 三维体素积云模型示意

Fig. 6 Schematic diagram of 3D voxel-based cumulus cloud model

究<sup>[29]</sup>, 结合积云结构的空分布特性, 本文构建了云粒子密度与云团厚度及体素空间位置之间的函数关系: 靠近云体中心区域的体素密度较高, 边缘区域密度较低, 且整体粒子密度随垂直高度增加而增强, 在云顶附近略有衰减。因此, 本文提出了一种基于体素空间位置的云粒子密度计算方法。

如图 7 所示, 对于每一个积云对象, 该方法建立了以积云底部中心点为原点的体素积云局部坐标系  $o' - xyz$ 。积云中每个体素的坐标记为  $(x, y, z)$ , 并为每个体素赋予相对位置标签, 描述积云外表面的体素赋予标签  $V_{\text{out}}$ , 其他位于积云内部的体素赋予标签  $V_{\text{in}}$ 。在此基础上, 将体素根据空间位置划分为三类。

(1) 积云外表面的体素 ( $\text{Voxel} = V_{\text{out}}$ )。

(2) 积云内部且位于积云底部的体素 ( $\text{Voxel} = V_{\text{in}} \&\& \cap z = 0$ )。

(3) 积云内部且不是积云底部的体素 ( $\text{Voxel} = V_{\text{in}} \&\& \cap z \neq 0$ )。

对上述三类体素分别计算云粒子密度值, 云粒子

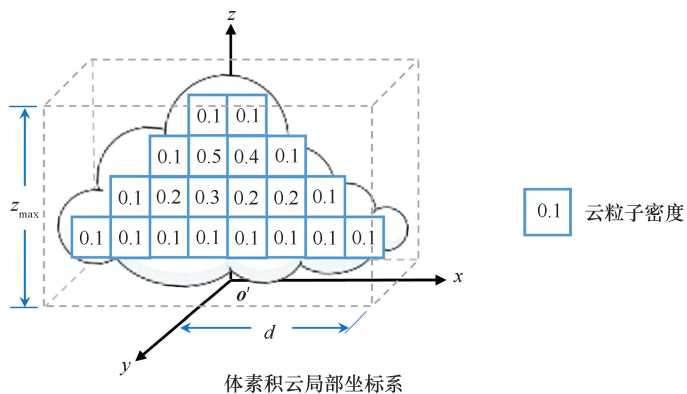


图 7 顾及云粒子密度的三维体素积云示意

Fig. 7 Schematic diagram of 3D voxel-based cumulus cloud model considering cloud particle density

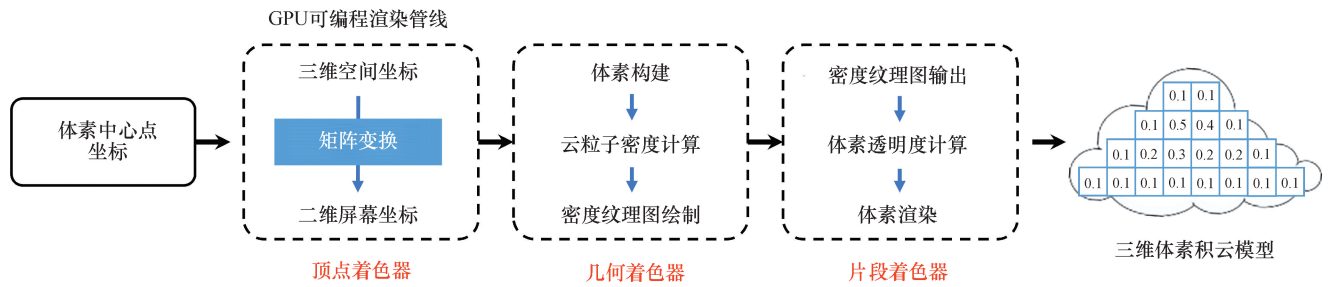


图8 基于GPU的三维体素积云建模方法

Fig. 8 GPU-based 3D voxel cumulus cloud modeling method

密度  $\rho_{(x, y, z)}$  的计算公式为

$$\rho_{(x, y, z)} = \begin{cases} 0.1, & (\text{Voxel} = V_{out}) \\ 1 - \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{d}, & (\text{Voxel} = V_{in} \& \& \cap z = 0) \\ \rho_{(x, y, 0)} + \frac{z}{z_{max}}, & (\text{Voxel} = V_{in} \& \& \cap z \neq 0) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $(x, y, z)$  为体素在体素积云局部坐标系下的坐标;  $d$  为积云在  $o' - xy$  平面上 ( $z = 0$ ) 到体素积云局部坐标系原点的最大长度;  $z_{max}$  为积云最大厚度。

根据公式(15), 三类体素的云粒子密度计算规则如下。

(1) 积云外表面体素 ( $\text{Voxel} = V_{out}$ ): 由于其位于云体边界, 距积云中心最远, 粒子浓度最低, 因此设定一个固定的背景密度值 0.1, 用于增强边界区域的视觉对比度与透明效果。

(2) 积云内部且位于积云底部的体素 ( $\text{Voxel} = V_{in} \& \& \cap z = 0$ ): 该类体素位于积云内部靠近底部的位置, 其云粒子密度仅与体素中心点到局部坐标系原点的水平距离  $d$  有关。  $d$  越小, 云粒子密度越大, 反之  $d$  越大, 云粒子密度越小。

(3) 积云内部非底部体素 ( $\text{Voxel} = V_{in} \& \& \cap z \neq 0$ ): 该类体素构成了积云主体部分。其粒子密度以同一垂直柱上底部体素的密度  $\rho_{(x, y, 0)}$  为基准, 并引入高度因子  $\frac{z}{z_{max}}$  调整密度随垂直方向的分布。随着高度增加, 密度逐渐增强, 直至云顶, 模拟粒子在弱对流条件下的垂直效应。

## 2.2 基于GPU的三维体素积云建模方法

地基云图具备较高的时间分辨率, 对积云建模的效率和响应速度提出了更高要求。为满足实时性与并行性能需求, 本文提出一种基于GPU的三维体素积云建模方法, 以提升建模计算效率和可视化渲染能力。

该方法采用CPU预处理与GPU并行建模的协同架构, 如图8所示。在CPU端预先计算由云基高度、云团厚度等关键参数; 随后将其传入GPU渲染管线, 通过顶点着色器、几何着色器与片段着色器实现高效三维体素建模流程。

基于GPU的三维体素积云建模方法主要分为三个步骤。

步骤一, 基于顶点着色器的顶点坐标变换。

顶点着色器作为GPU渲染管线中的第一阶段, 接受了从CPU传入的体素中心点坐标, 并通过矩阵变换将三维坐标  $V_{local}$  转换到二维屏幕坐标系中的坐标  $V_{clip}$ , 以满足GPU渲染管线中后续计算的需要, 从而确定体素中心点在屏幕中的位置信息。计算公式为

$$V_{clip} = M_{proj} \times M_{view} \times M_{model} \times V_{local} \quad (16)$$

式中,  $M_{model}$  为模型矩阵;  $M_{view}$  为视图矩阵;  $M_{proj}$  为投影矩阵。

步骤二, 基于几何着色器的顾及云粒子密度的体素绘制。

几何着色器接收了顶点着色器输出的顶点图元, 以顶点图元为中心构建立方体体素。本文采用了一种顶点索引绘制的方式构建体素, 即定义体素的8个顶点坐标和顶点索引, 在绘制图元时通过指定索引查找相应的顶点坐标, 避免了冗余的顶点数据存储。如图9所示, 定义了8个顶点坐标相对于体素中心点的相对坐标,  $L$  由  $L_{voxel}$  计算得到, 计算公式为

$$L = \frac{L_{voxel}}{2} \quad (17)$$

步骤三, 基于片段着色器的三维体素积云渲染。

片段着色器作为GPU渲染管线中的最后一个计算, 接收了由几何着色器输出的体素和云密度纹理图, 并根据云粒子密度值  $\rho$  定义体素纹理。片段着色器采用  $R$ 、 $G$ 、 $B$ 、 $A$  四个颜色分量决定场景渲染的颜色, 四个颜色分量的取值范围均为 0 至 1.0。

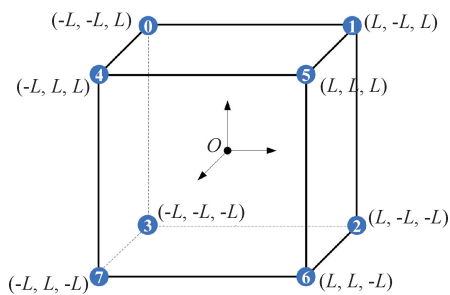


图9 体素顶点坐标和顶点索引示意

Fig. 9 Schematic diagram of voxel vertex coordinates and vertex indices

由于晴空环境下的积云呈亮白色, 因此体素颜色的线性 RGB 值设置为固定值 0.8, 而透明度随云粒子密度值  $\rho$  变化,  $\rho$  越小, 透明度越高, 实现在屏幕中的三维体素积云渲染。体素的颜色和透明度参数计算公式为

$$\text{color. } RGBA = (0.8, 0.8, 0.8, \rho) \quad (18)$$

综上所述, 论文基于 GPU 实现了三维体素积云建模的主要过程, 该方法仅在 CPU 中保留了简单的顶点计算, 而复杂的几何图形计算和渲染均在 GPU

可编程渲染管线中进行, 为实现高效的三维体素积云建模提供了算法支撑。

### 3 结果与分析

#### 3.1 数据来源

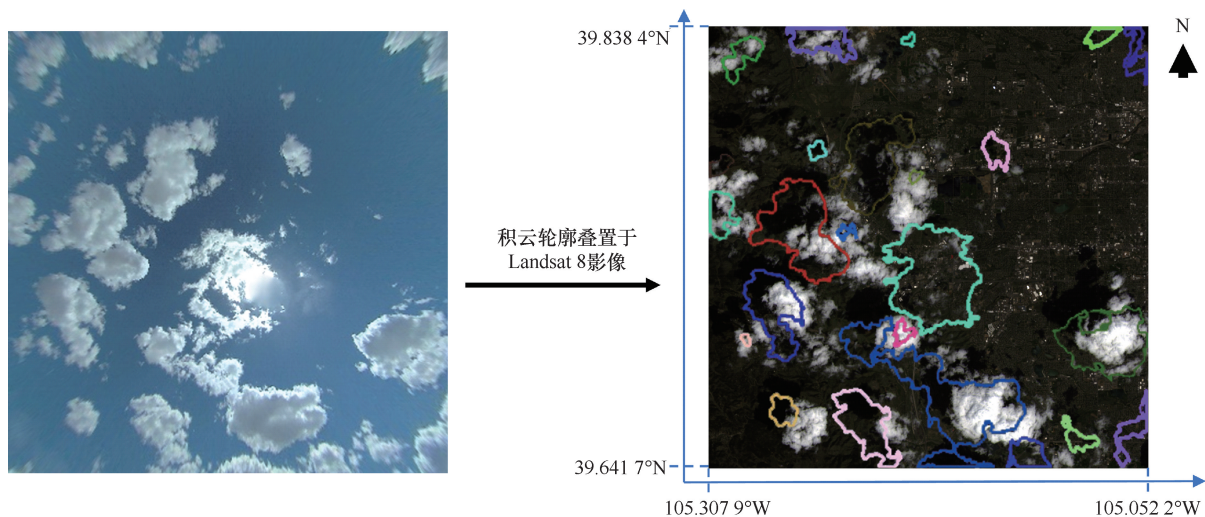
本文试验数据选取自 NERL 公开数据库中 2019 年 9 月 2 日 10:40 (GMT-7) 采集的地基云图。经图像预处理后获得校正图像 [见图 10(a)], 并提取云团轮廓区域, 叠加至同期的 Landsat 8 遥感影像中 [见图 10(b)], 实现地基图像与遥感影像的空间配准。根据图像映射结果, 可确定该数据在 WGS84 坐标系下的地理覆盖范围为: 纬度  $39.6417^{\circ}\text{N}$ — $39.8384^{\circ}\text{N}$ , 经度  $105.0522^{\circ}\text{W}$ — $105.3079^{\circ}\text{W}$ 。

#### 3.2 三维积云建模参数的计算和验证

##### 3.2.1 云基高度计算与验证

对 2019 年 5 月 13 日 10:40 (GMT-7) 的地基云图中的积云进行云基高度计算, 该图像中共识别出 24 个积云对象, 云基高度计算结果如表 1 所列。

为验证基于地基云图所计算的云基高度结果的准确性, 本文开展了与遥感影像反演方法的对比分析



(a) 已校正的地基云图2019-05-13 10:40 (GMT-7)

(b) Landsat 8影像2019-05-13 10:43 (GMT-7)

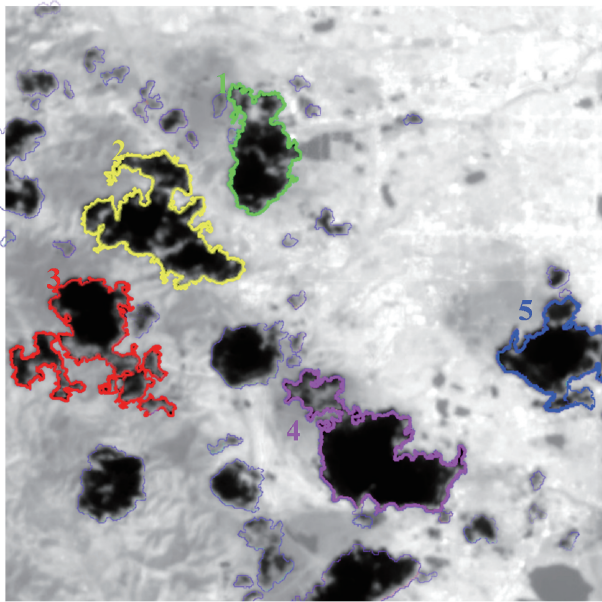
图10 地基云图的积云区域在遥感影像中映射结果

Fig. 10 Mapping results of cumulus cloud region from ground-based image to remote sensing image

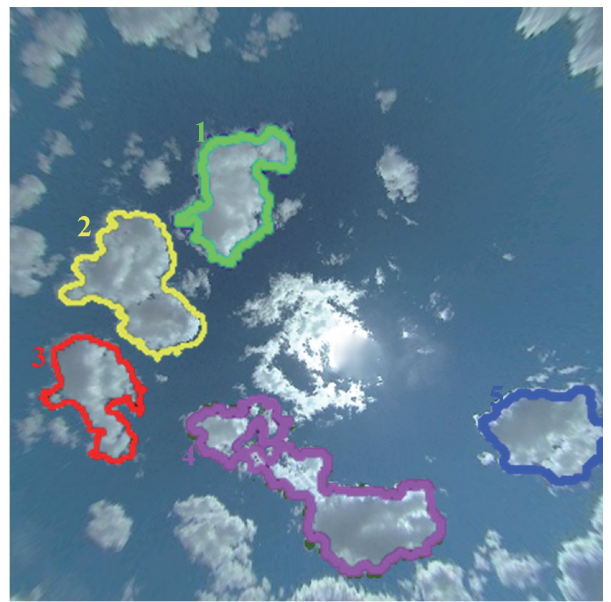
表1 云基高度计算结果表(地基云图 2019-05-13 10:40 (GMT-7))

Table 1 Cloud base height calculation results (ground-based cloud image on 2019-05-13 10:40 (GMT-7))

ID	CBH/m	ID	CBH/m	ID	CBH/m	ID	CBH/m
1	1 289.306	7	1 410.506	13	1 400.942	19	1 286.090
2	1 451.265	8	1 476.886	14	1 231.901	20	1 316.975
3	1 360.093	9	1 216.653	15	1 426.908	21	1 307.747
4	1 243.215	10	1 415.541	16	1 215.653	22	1 233.678
5	1 540.601	11	1 251.029	17	1 370.868	23	1 490.319
6	1 587.650	12	1 560.253	18	1 564.607	24	1 544.145



(a) 2019-05-13 10:43 (GMT-7)



(b) 2019-05-13 10:40 (GMT-7)

图 11 面向积云对象的云基高度值验证示意

Fig. 11 Schematic diagram of validation of cloud base height for cumulus clouds

试验。遥感反演方法通常利用热红外波段估算地表温度,并结合大气垂直温度递减率反推出云高,是当前较为常用的云高估算手段之一<sup>[30]</sup>。本文选取与地基云图同步时刻获取的 Landsat 8 影像,采用该方法对典型云区进行云基高度反演,并与地基云图计算结果进行对比评估。

以 2019 年 5 月 13 日 10:43(GMT-7)采集的地基云图为例,图 11(a)为 Landsat 8 影像反演的地表温度图,图 11(b)为对应地基云图。根据地表温度与海拔高度的负相关关系,从图像中选取 5 个典型云团区域,分别利用遥感反演法与本文方法进行 *CBH* 计算,结果汇总如表 2 所列。

表 2 云基高度 (*CBH*) 计算结果对照Table 2 Comparison of cloud base height (*CBH*) calculation results

项 目	积云 ID	基于 Landsat 8 的计算结果/m	本文方法的计算结果/m	$\Delta/\%$
地基云图数据集 1 2019-5-13 10:43 (GMT-7)	1	1 560.573	1 482.475	-5.00
	2	1 224.806	1 198.756	-2.13
	3	1 410.413	1 345.256	-4.62
	4	1 689.674	1 614.563	-4.45
	5	1 269.988	1 196.358	-5.80

在表 2 中,“ $\Delta$ ”栏表示本文方法计算的云基高度结果与基于 Landsat 8 影像反演结果之间的相对误差。以 2019 年 5 月 13 日 10:43(GMT-7)获取的地基云图为例,所计算的云基高度与同期 Landsat 8 影像

估算结果的误差分别为 5.0%、2.13%、4.62%、4.45%和 5.80%。

从绝对值差异来看,全部误差均控制在 100 m 以内,具有较高的一致性。整体趋势上,地基云图估算的云基高度略低于遥感影像结果,主要原因在于遥感影像采用空对地成像方式,存在一定的云高高估倾向<sup>[30]</sup>。

综上所述,本文验证了基于地基云图计算云基高度的有效性和准确性,为在三维地理场景中构建真实可信的三维体素积云模型提供了关键的建模参数支持。

### 3.2.2 积云厚度和云粒子密度计算与验证

积云厚度作为三维积云建模的关键参数,直接影响云体的垂直结构表达与云顶起伏特征的准确性。本文基于前述建模方法,计算了积云区域内各体素的云粒子密度值,用以刻画云体的内部结构分布特性。

试验选取图 11(b)所示的 1 号与 2 号积云对象,分别进行积云厚度与云粒子密度的计算,并对其垂直剖面进行可视化展示,如图 12 所示。根据本文对云粒子密度的定义,其取值范围为 0.1~1。计算结果表明:云体中心区域的体素密度显著高于边缘区域,呈现出由内向外递减的分布趋势,符合积云内部水滴浓度“中心高、边界低”的典型空间特征。

为进一步验证云粒子密度计算方法的合理性,本文引入 CloudSat 卫星的 2B-GEOPROF-LIDAR 云剖

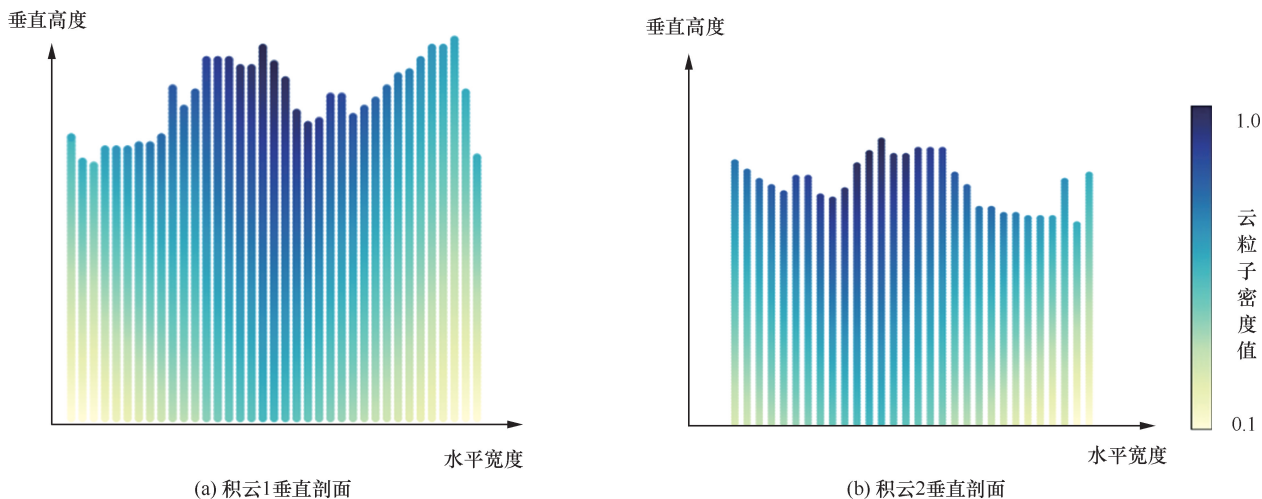


图 12 积云垂直剖面云粒子密度示意

Fig. 12 Schematic diagram of cloud particle density in vertical profile of cumulus clouds



图 13 2B-GEOPROF-LIDAR 的雷达反射率因子

Fig. 13 Radar reflectivity factor of 2B-GEOPROF-LIDAR

面产品进行对比分析。该产品融合了云剖面雷达 (CPR) 与 CALIPSO 激光雷达数据, 能够提供云体在垂直方向上的云水凝物分布信息, 广泛应用于云内部结构研究领域。

本文选取 2019 年 5 月 13 日 10:45 (GMT-7) CloudSat 在约 (39°N, 105°W) 区域获取的反射率因子图作为验证依据, 如图 13 所示。结合同期 Landsat 8 影像[见图 11(b)]可知, 该区域主要为低层积云, 空间分布稀疏、尺度较小, 与图 13 中雷达图像所示的积云剖面特征一致。反射率剖面显示, 云体中心区域的雷达反射率显著高于边缘区域, 表明其云滴数浓度较大。考虑到云粒子密度参数基于云滴数浓度构建, 二者具有一致的变化趋势, 即反射率越高, 云粒子密度亦越大, 验证了本文方法在粒子密度估算方面的有效性与物理一致性。

综上所述, 试验结果表明, 所构建的云粒子密度

参数在空间分布趋势上与云滴数浓度具有良好的一致性, 验证了体素计算方法在三维积云模型构建中的有效性与物理合理性。

### 3.3 基于 GPU 的三维体素积云建模与效率验证

积云作为形态复杂的三维非刚性对象, 对建模效率与可视化性能均提出较高要求。为满足地基云图高时空分辨率下的快速建模需求, 本文提出一种基于 GPU 并行计算的三维体素积云建模方法, 在三维地理场景中实现高效可视化, 如图 14 所示。

为评估该方法在建模效率与场景流畅度方面的优势, 本文设计与基于 CPU 的传统方法、基于粒子系统方法<sup>[31]</sup>的对比试验。三种方法分别在相同地基云图数据集下构建三维积云场景, 测试过程包括: (1) 影像与地形要素加载; (2) 建模参数计算与体素建模; (3) 三维场景漫游交互。通过帧率 (FPS) 和 GPU 占用率进行定量评估, 结果如图 15 所示。

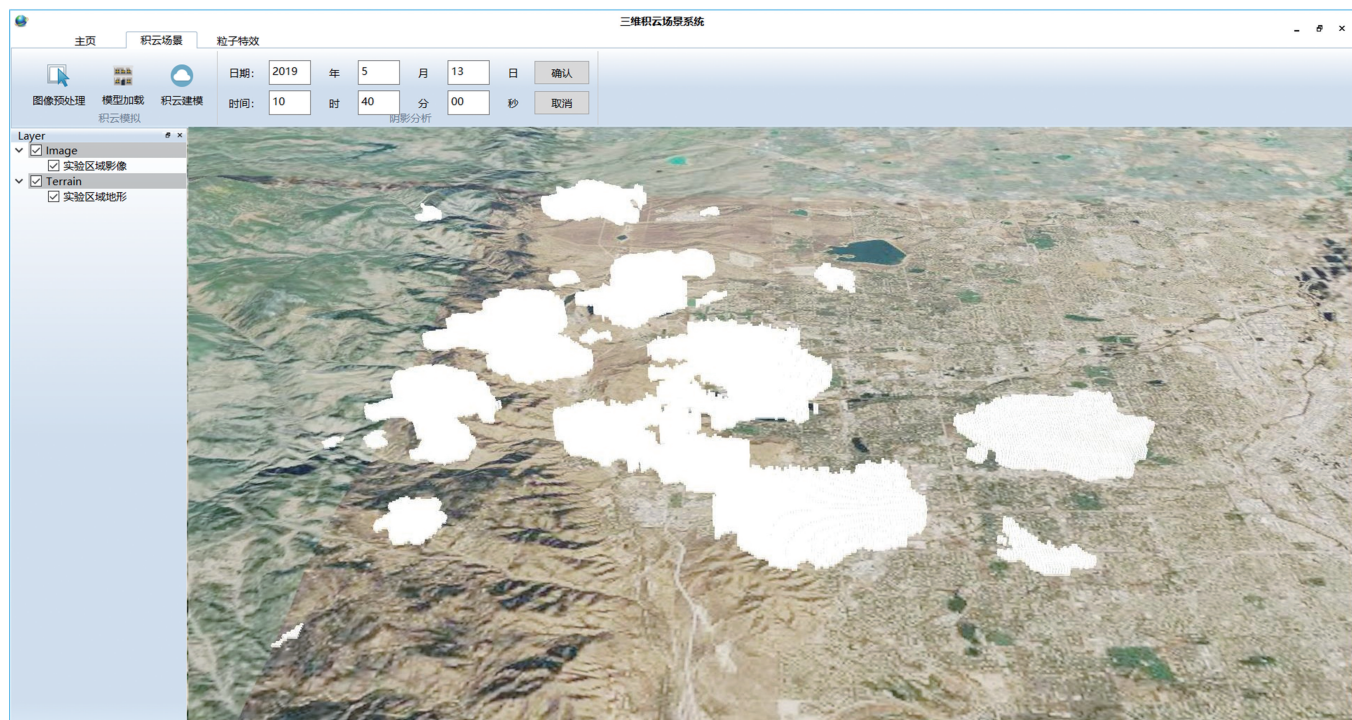


图 14 三维积云场景示意

Fig. 14 Schematic diagram of 3D cumulus cloud scene

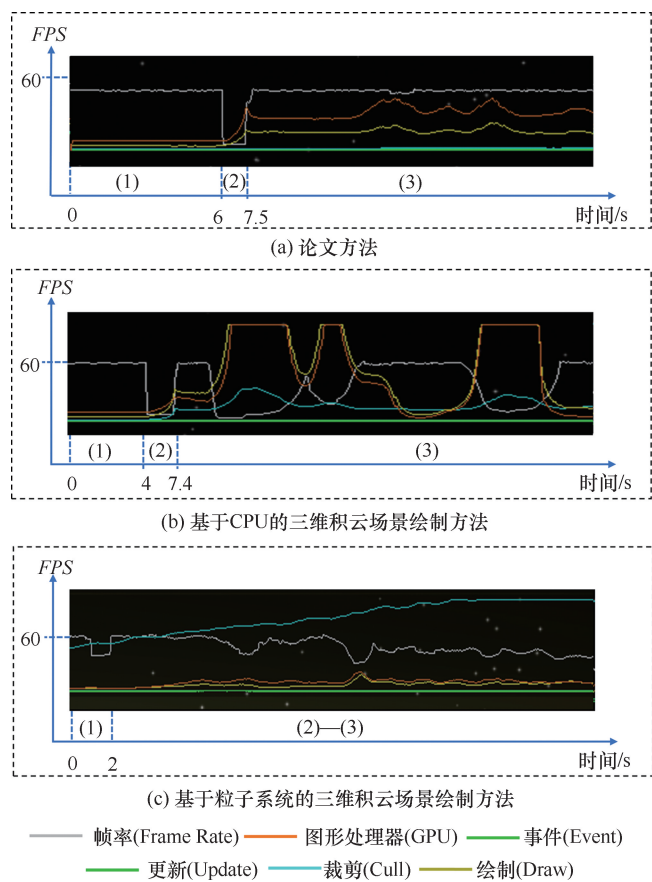


图 15 三维积云建模方法的效率对比示意

Fig. 15 Comparison of efficiency among different 3D cumulus cloud modeling methods

结果显示, 在阶段(1)非建模操作过程中, 三种方法的帧率均稳定在 60 FPS, 说明该阶段对系统性能影响较小; 在阶段(2)建模过程中, 本文所提出的 GPU 方法建模耗时仅 1.5 s, 显著优于 CPU 方法 (3.4 s) 和粒子系统方法 (2.0 s), 体现出较强的建模效率; 在阶段(3)三维场景交互过程中, GPU 方法帧率始终维持在 60 FPS, 具备良好的交互响应能力; 相比之下, CPU 方法帧率波动明显, 存在显著卡顿现象, 且 GPU 资源占用剧增; 粒子系统方法帧率在 20~35 FPS 之间波动, 整体流畅性较差。

上述结果表明, 本文提出的基于 GPU 的三维体素积云建模方法能够实现目标区域内积云的高效重建, 并在三维场景中保持优异的渲染性能与交互稳定性, 显著优于现有传统方法。

综上, 本文系统验证了基于地基云图的关键建模参数的可计算性与准确性, 构建了适用于地理三维环境的真实体素积云模型。所提出的 GPU 建模方法在保证建模精度的同时, 显著提升了三维场景的可视化性能, 为光伏应用中积云的实时建模与动态分析提供了技术支撑

## 4 结论

针对光伏发电场景下基于图像构建真实三维地理环境中积云模型的关键难点, 本文提出了一种基于地

基云图的三维体素积云建模方法。在完成地基云图预处理的基础上,研究了积云区域的空间定位方法,并实现了云基高度与云团厚度两个关键建模参数的计算。进一步引入云粒子密度参数,设计了体素化表达结构,并基于GPU渲染管线构建了兼顾积云外形与内部密度特征的三维体素模型。

结果表明,本文方法能够在三维地理场景中快速、高效地构建真实积云模型,具有良好的建模精度与可视化性能。同时,云粒子密度的引入提升了模型对辐射遮蔽特征的表达能力,为后续光伏辐照度分析等应用提供了重要支撑。未来将围绕模型在光伏应用中的集成与拓展,深入研究积云形态对太阳能输出的遮蔽效应,提升辐照度预测的精度与系统响应能力,为光伏发电系统的智能调控提供技术支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2025, 25(1): 1-12.
- LI G Y. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: A speech at the 2025 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(1): 1-12.
- [2] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 1-3.
- LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 1-3.
- [3] MARINIĆ-KRAGIĆ I, NIŽETIĆ S, GRUBIŠIĆ-ČABO F, et al. Analysis of flow separation effect in the case of the free-standing photovoltaic panel exposed to various operating conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 53-64.
- [4] 赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-458.
- ZHAO P, PU T J, WANG X Y, et al. Key technologies and perspectives of power Internet of Things facing with digital twins of the energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-458.
- [5] ZHU T T, ZHOU H, WEI H K, et al. Inter-hour direct normal irradiance forecast with multiple data types and time-series [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1319-1327.
- [6] 方明, 张利箭. 一种基于决策融合策略的全天空地基云图云量估

计方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 245-254.

FANG M, ZHANG L J. Cloud cover estimation method of all-sky ground-based cloud image based on decision fusion strategy[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(10): 245-254.

- [7] 贾克斌, 张亮, 刘鹏宇, 等. 基于轻量级神经网络的地基云图识别[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(5): 489-499.
- JIA K B, ZHANG L, LIU P Y, et al. Ground-based cloud recognition based on lightweight neural network [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(5): 489-499.
- [8] LIN F, ZHANG Y, WANG J X. Recent advances in intra-hour solar forecasting: A review of ground-based sky image methods [J]. International Journal of Forecasting, 2023, 39(1): 244-265.
- [9] KLEISS J M, RILEY E A, LONG C N, et al. Cloud area distributions of shallow cumuli: A new method for ground-based images[J]. Atmosphere, 2018, 9(7): 258.
- [10] KHAIN A, OVTCHINNIKOV M, PINSKY M, POKROVSKY A, KRUGLIAK H. Notes on the state-of-the-art numerical modeling of cloud microphysics [J]. Atmospheric Research, 2000, 55(3-4): 159-224.
- [11] HU D B, XIAO J B, HU J H. Real-time simulation of dynamic cloud based on fractal [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 220: 2841-2845.
- [12] 程文聪, 王志刚, 张文军, 等. 基于生成对抗网络的三维云构建方法[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 33-40.
- CHENG W C, WANG Z G, ZHANG W J, et al. 3D cloud construction method based on generative adversarial network [J]. Computer Simulation, 2022, 39(8): 33-40.
- [13] ELEK O, RITSCHER T, WILKIE A, et al. Interactive cloud rendering using temporally coherent photon mapping[J]. Computers & Graphics, 2012, 36(8): 1109-1118.
- [14] GOSWAMI P. A survey of modeling, rendering and animation of clouds in computer graphics [J]. The Visual Computer, 2021, 37(7): 1931-1948.
- [15] JIMÉNEZ DE PARGA C, GÓMEZ PALOMO S R. Efficient algorithms for real-time GPU volumetric cloud rendering with enhanced geometry[J]. Symmetry, 2018, 10(4): 125.
- [16] YUAN C Q, LIANG X H, HAO S Y, et al. Modelling cumulus cloud shape from a single image[J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(6): 288-297.
- [17] ZHANG Z L, LIANG X H, YUAN C Q, et al. Modeling cumulus cloud scenes from high-resolution satellite images [J]. Computer Graphics Forum, 2017, 36(7): 229-238.
- [18] CAI C R, ALIPRANTIS D C. Cumulus cloud shadow model for analysis of power systems with photovoltaics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4496-4506.
- [19] 李国英. 深入贯彻落实党的二十大精神 扎实推动新阶段水利高质量发展: 在 2023 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发

- 展研究, 2023, 23(1): 1-11.
- LI G Y. Thoroughly implement the spirit of the 20<sup>th</sup> National Congress of the Communist Party of China and solidly promote the high-quality development of water conservancy in the new stage: Speech at the National Water Conservancy Work Conference in 2023 [J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(1): 1-11.
- [20] 朱想, 周海, 朱婷婷, 等. 光伏系统中地基云图的预处理[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 140-145.
- ZHU X, ZHOU H, ZHU T T, et al. Pre-processing of ground-based cloud images in photovoltaic system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 140-145.
- [21] MARQUEZ R, COIMBRA C F M. Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis[J]. *Solar Energy*, 2013, 91: 327-336.
- [22] LI X, LU Z Y, ZHOU Q X, et al. A cloud detection algorithm with reduction of sunlight interference in ground-based sky images [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(11): 640.
- [23] HUANG M, WU J, P Z Y, et al. High-precision calibration of wide-angle fisheye lens with radial distortion projection ellipse constraint (RDPEC) [J]. *Machine Vision and Applications*, 2022, 33(3): 44.
- [24] LI Q Y, LU W T, YANG J. A hybrid thresholding algorithm for cloud detection on ground-based color images[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28(10): 1286-1296.
- [25] RODTS S M A, DUYNKERKE P G, JONKER H J J. Size distributions and dynamical properties of shallow cumulus clouds from aircraft observations and satellite data[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(16): 1895-1912.
- [26] GUTIÉRREZ-TRASHORRAS A J, VILICAÑA-ORTIZ E, ÁLVAREZ-ÁLVAREZ E, et al. Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 93-106.
- [27] LI X T, WANG B Z, QIU B, et al. An all-sky camera image classification method using cloud cover features [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(11): 3629-3639.
- [28] COHEN-OR D, KAUFMAN A. 3D line voxelization and connectivity control [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2002, 17(6): 80-87.
- [29] GROSVENOR D P, SOURDEVAL O, ZUIDEMA P, et al. Remote sensing of droplet number concentration in warm clouds: A review of the current state of knowledge and perspectives [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(2): 409-453.
- [30] SUN L, LIU X Y, YANG Y K, et al. A cloud shadow detection method combined with cloud height iteration and spectral analysis for Landsat 8 OLI data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 138: 193-207.
- [31] FERREIRA BARBOSA C W, DOBASHI Y, YAMAMOTO T. Adaptive cloud simulation using position based fluids [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2015, 26: 367-375.

(责任编辑 王海锋)