



星载全波形激光雷达森林分层叶面积指数估算研究

课题主持人：李益 2021级博

指导教师：阎广建 教授

研究目标与内容

星载全波形激光雷达具有全球尺度的森林垂直结构观测能力，开展基于星载全波形激光雷达的森林垂直分层叶面积指数遥感反演研究对于冠层辐射传输、陆面过程、生态、水文、气候等模型的精确模拟，提升全球陆地碳储量估算精度，深入理解森林的碳氮水循环过程及对全球气候变化的响应机制，实现森林生态系统生物多样性的立体监测以及科学规划森林经营管理方案等方面具有重要意义。

本研究以星载全波形激光雷达森林垂直结构参数反演与验证为最终目标，具体包括如下三个方面：1) 厘清激光雷达与森林冠层作用机理，构建面向垂直结构参数反演的森林冠层分层间隙率模型，发展基于机理模型的星载全波形激光雷达波形模拟方法；2) 构建分层间隙率、冠层高度分布与叶面积体密度之间的显式表达式，充分挖掘星载全波形激光雷达的回波信息，实现分层叶面积指数的联合反演；3) 发展机载激光雷达点云垂直结构参数反演新方法，助力星载全波形激光雷达分层叶面积指数反演结果的精度验证。

研究进展与成果

一、阐明了激光雷达森林冠层作用机理

1.1 分层间隙率模型构建

结合路径长度分布模型，推导出新的分层间隙率模型并提出了适用于反演的简化形式间隙率模型：

$$\text{当 } 0 \leq z \leq l' \text{ 时: } P(z) = 1 - uG \int_0^z e^{-uGz} \left(\int_0^z p(l_{\max} - \frac{l_{\max}}{l'} l) e^{uGl} dl \right) dz \quad (1)$$

$$l' < z \leq l_{\max} \text{ 时: } P(z) = 1 - uG \int_0^z e^{-uGz} \left(\int_0^{l_{\max}-z} p(l_{\max} - \frac{l_{\max}}{l_{\max}-l'} l) e^{uGl} dl \right) dz \quad (2)$$

进一步推导了适用于反演的简化形式间隙率模型：

$$P(z) = 1 - h(z) * g(z) \quad \text{其中} \quad g(z) = \begin{cases} 1 - e^{-G\mu z} & 0 \leq z \leq h_{\max} \\ 1 - e^{-G\mu h} & z > h_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

结合计算机模拟模型，初步验证了适用于反演的间隙率模型的准确性：我们的间隙率模型的误差仅为0.47%，而被广泛使用的Ni等(2001)提出的方法有2.27%的低估偏差(图1)。

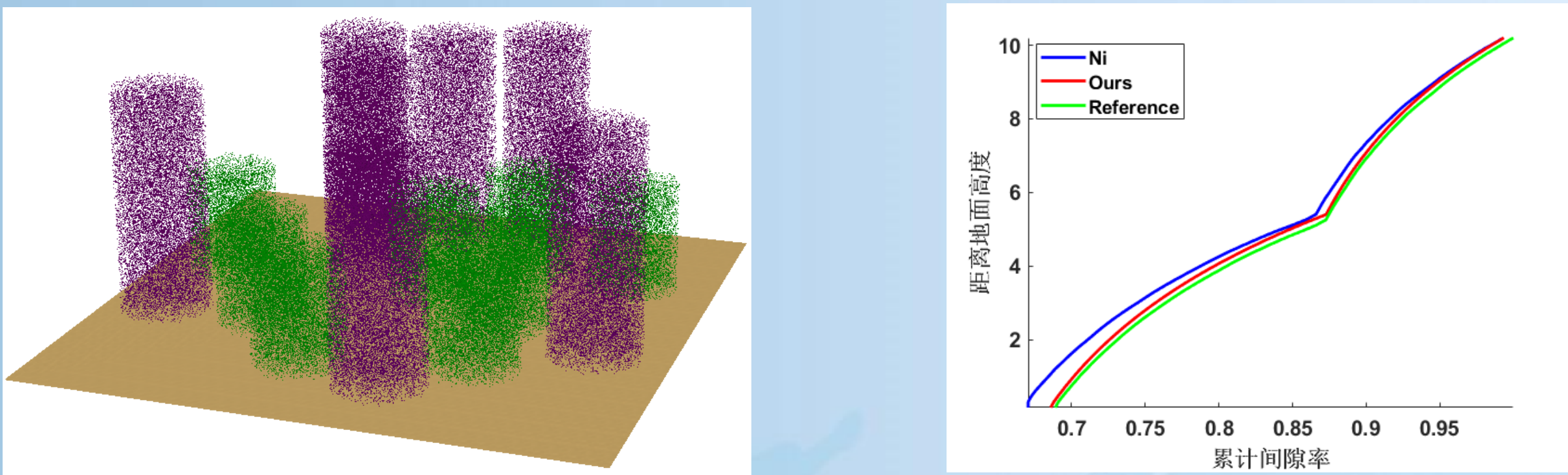


图1 利用计算机模拟模型验证分层间隙率模型精度

1.2 星载全波形激光雷达回波模拟方法

本研究首次从植被冠层辐射传输机理的角度，实现了从机载/无人机激光雷达点云模拟大光斑全波形森林冠层回波信号。具体方法如图2所示：

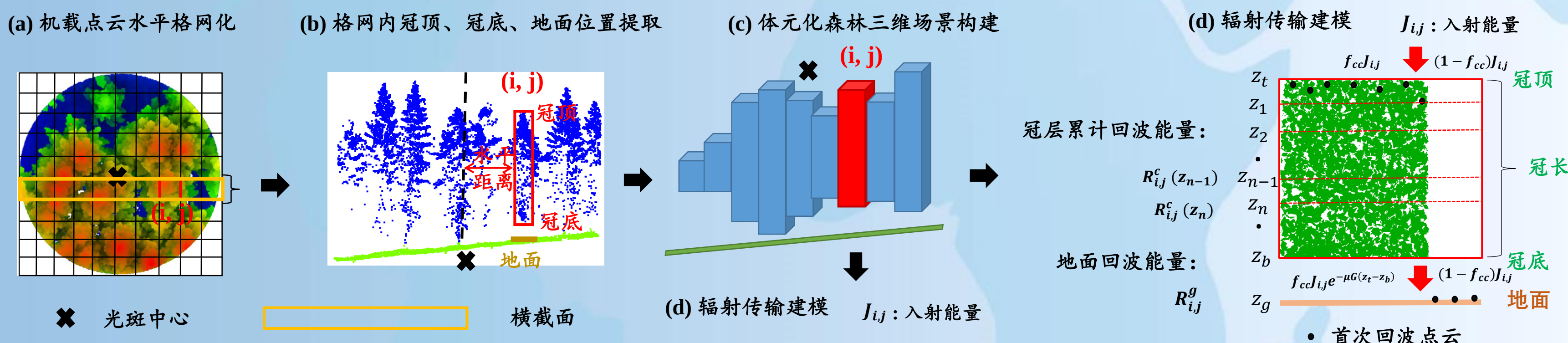


图2 波形模拟方法流程

表1 不同方法及数据类型的GEDI波形模拟结果比较

数据类型	平均可决系数				平均均方根误差			
	Ours	Count	Int	Frac	Ours	Count	Int	Frac
抽象树冠模拟数据	1.00	0.00	1.00	0.87	0.01	0.34	0.01	0.09
真实冠层模拟数据	0.93	0.87	0.89	0.70	0.07	0.11	0.09	0.12
真实测量数据	0.78	0.73	0.73	0.71	0.13	0.15	0.15	0.16

我们方法的模拟结果与GEDI波形模拟器提供的三种方法进行比较。选取可决系数和均方根误差作为评估指标，结果如上表2所示。

二、提出了星载全波形激光雷达分层叶面积指数估算新方法

将本研究提出的针对星载全波形激光雷达简化的垂直累计分层间隙率模型与Ni提出的累计间隙率模型联合：

$$P(z) = 1 - \frac{R_v(z)}{R_v(0)} \times \frac{1}{1 + \frac{\rho_v}{\rho_g} \times \frac{R_g}{R_v(0)}} \quad (4)$$

首次建立了回波信号与叶面积体密度、冠层高度分布的显示表达式，利用查找表反演，结合路径长度分布估算分层叶面积指数，验证结果如下图3所示。

$$d(R_v(z)) = d[h(z) * (1 - e^{-G\mu z})] \times R_v(0) \times \left[R_v(0) + \frac{\rho_v}{\rho_g} R_g \right] * S(z - z_i) \quad (5)$$

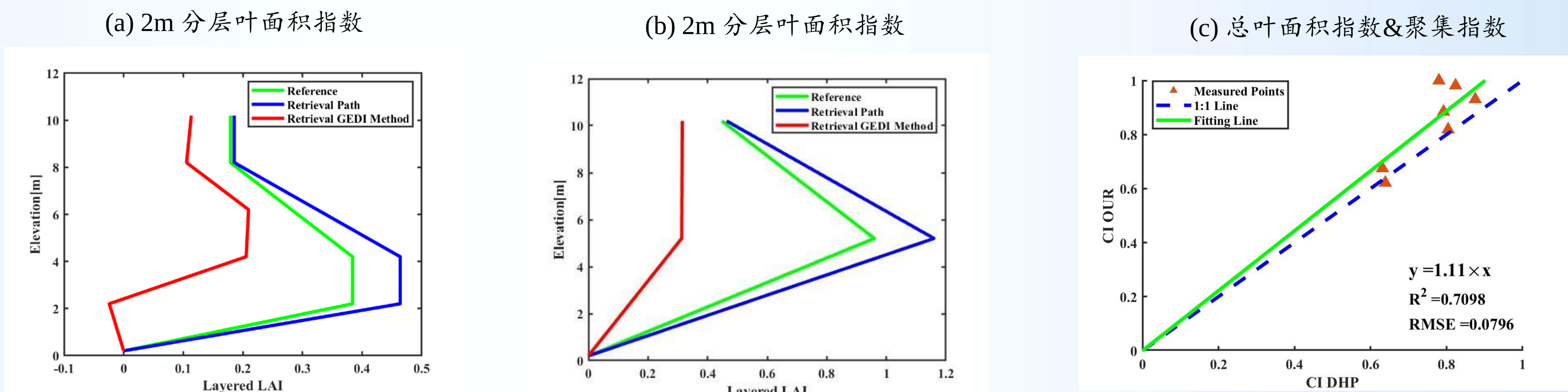


图3 分层、总叶面积指数及聚集指数反演精度验证

三、发展了机载激光雷达点云森林垂直结构参数提取新算法

针对机载激光雷达点云，提出基于标记控制分水岭与连通中心烟花聚类的单木分割方法，分割出研究区近1000万棵单木，并提取每木的树高、冠幅、冠面积、冠体积等结构参数(如下图4所示)。

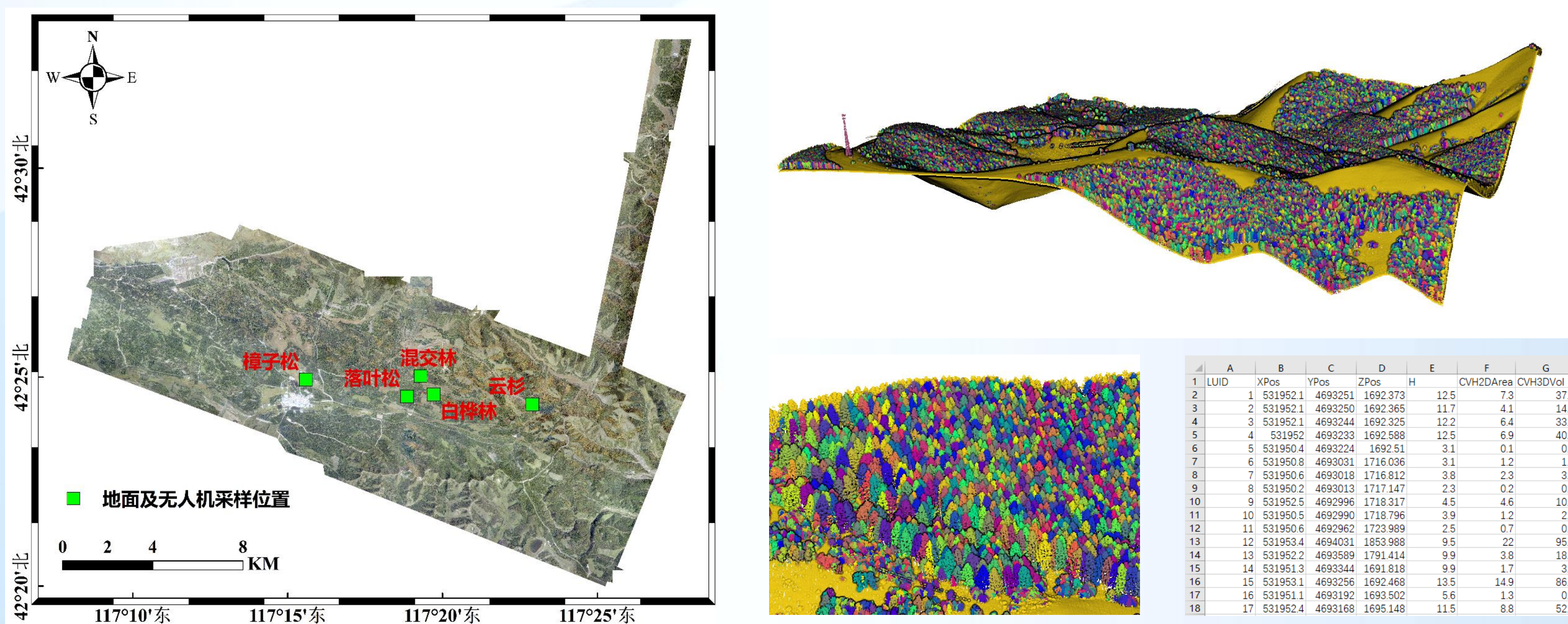


图4 机载激光雷达点云提取森林垂直结构参数结果展示

主要研究结论

- ✓ 本研究通过理论推导厘清了星载全波形激光雷达森林冠层作用机理，分析分层叶面积指数估算过程中的重要影响因素和核心问题，为分层叶面积指数反演研究提供理论基础；
- ✓ 充分挖掘了波形信息，显式表达了冠层高度分布、叶面积体密度与全波形回波信号之间的联系并提出一种新的森林冠层分层叶面积指数估算方法；
- ✓ 发展了机载激光雷达点云森林垂直结构参数估算方法并进行了大范围应用，为大范围分层叶面积指数反演结果的精度验证奠定了基础。

相 [1] Yi Li, et al. "Individual tree segmentation of airborne and UAV LiDAR point clouds based on the watershed and optimized connection center evolution clustering." Ecology and Evolution, 2023.

关 [2] 谢东辉, 李益*, 等. “基于多源遥感数据的数字林场信息提取与系统构建.” 遥感学报, 2023 (已接收).

成 [3] 李益. “多算法集成机载激光雷达点云单木分割软件.” 软件著作权, 2022.

果 [4] Yi Li., et al. "Radiative Transfer Modeling for Space-borne Waveform Simulation in Forests Using Airborne LiDAR Point Clouds." In Submit.