



北京林业大学



北京師範大學  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY

# 三维辐射传输模型在森林植被 近地面航空遥感中的应用

李林源

[lilinyuan@bjfu.edu.cn](mailto:lilinyuan@bjfu.edu.cn)

Co-contribution: 刘尚博, 余世有

2023.8.16

**HUANG-Lab**  
RS Forest group

01

森林的近地面航空遥感现状

02

3D RTM革新近地面航空遥感方法

03

3D RTM在近地面航空遥感中的前景

01

## 森林的近地面航空遥感现状

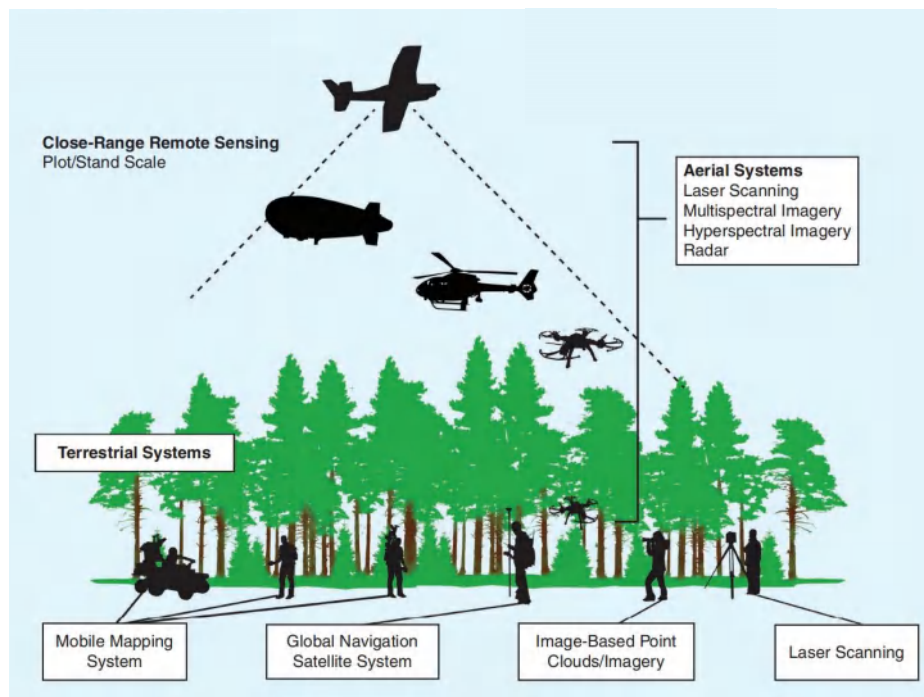
# 一 林学与生态学调查的需求与局限性

- 林业中的样地/小班尺度调查需要**测树因子**的详细测量
- 森林保护中的样地调查需要**病虫害指示因子**的精确测量
- 生态学中的单株/种群/群落尺度调查需要**植物功能性状**的精细测量
- 地面测量效率低下、空间连续性差、受限于可到达性

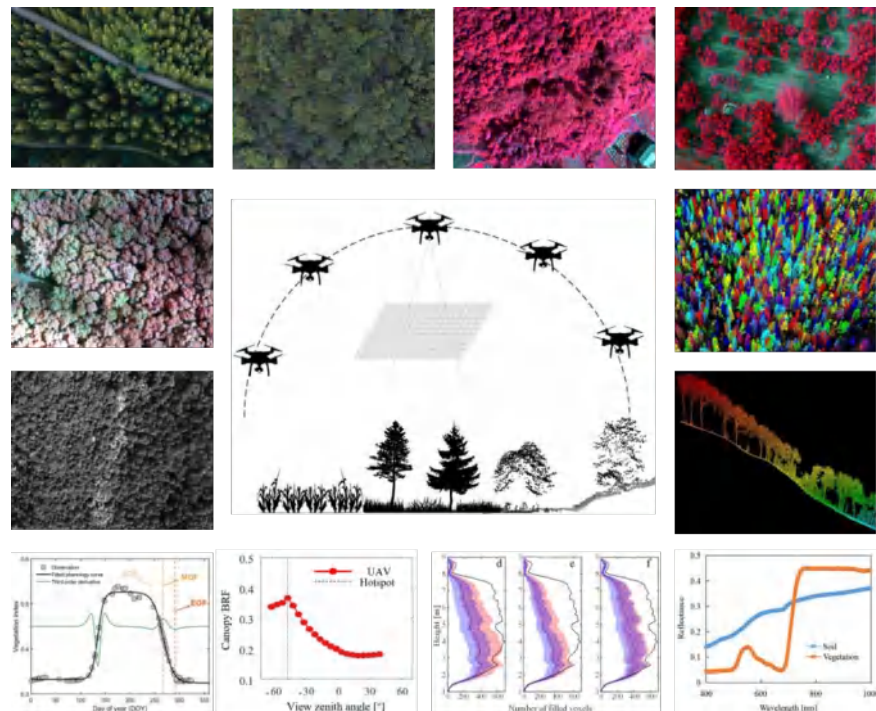


# 一 近地面航空遥感的优势

- 高效、灵活、成本低，实现“**既见树木，又见森林**”
- 超高空间分辨率，确保“**看得清、看得细**”
- 数据类型丰富多样，联合“**多模态多维度数据**”优势



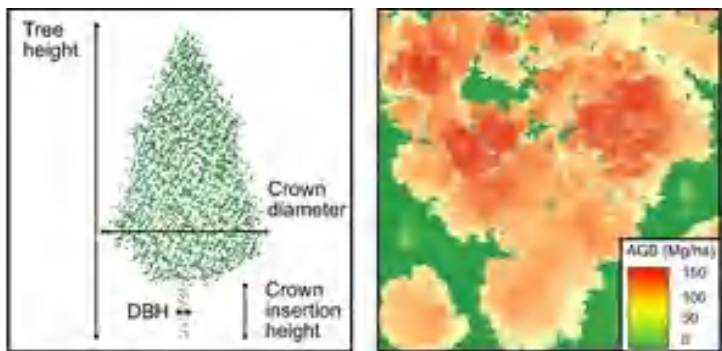
(Liang et al., 2022)



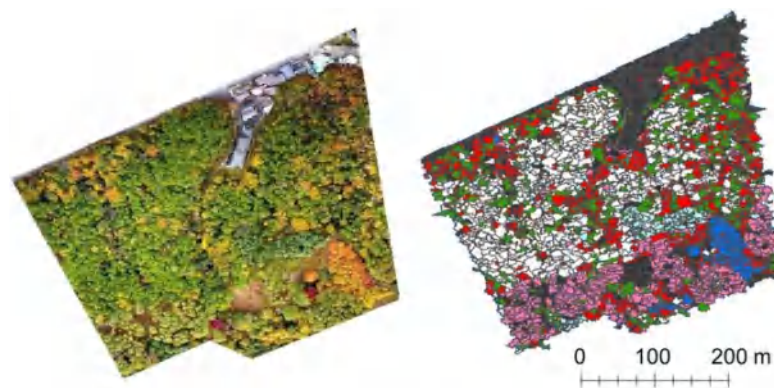
(Li, in preparation)

# 一 森林植被近地面航空遥感的监测模式

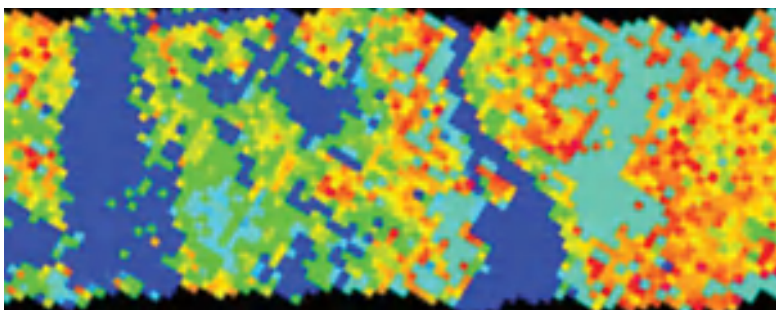
- 近地面森林遥感是通过搭载在近地面平台（如无人机）上的特定传感器进行非接触式观测，进而**量测**、**分类**、**反演**森林植被的时空状态。



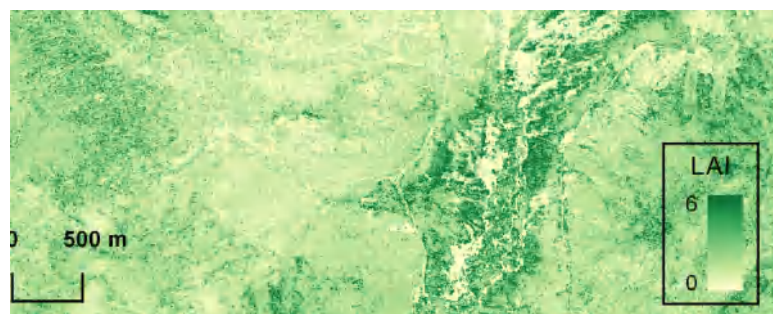
(Camarretta et al., 2020)



(Onishi et al., 2021)



(Asner et al., 2015)



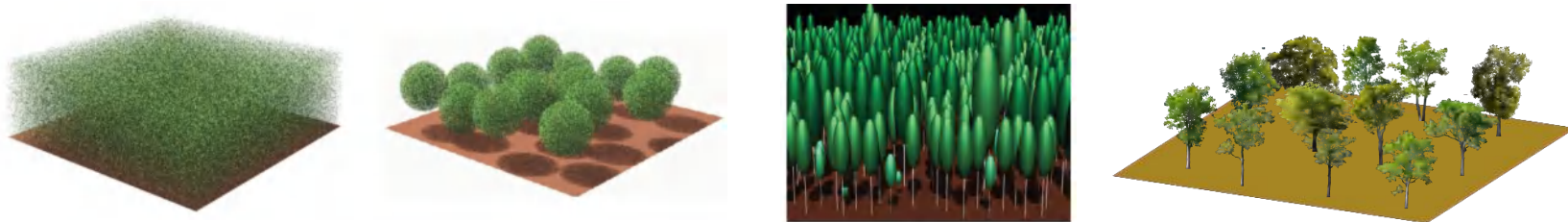
(Hu et al., 2018)

# 一 近地面航空遥感监测面临的典型问题

## ■ (1) 模型的适用性 (反演)

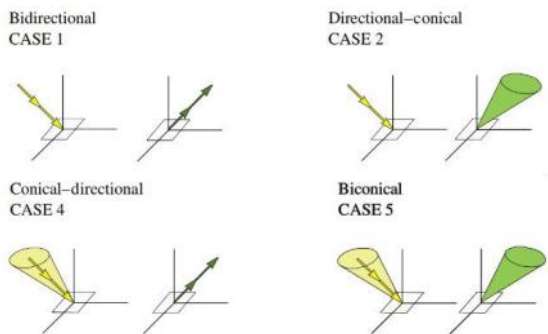
- ✓ 冠层尺度模型；模型代表性不够高；部分植被变量并非“显式”的模型参数

$$\rho_c = f(LAI, LAD, \rho, \tau, \dots)$$

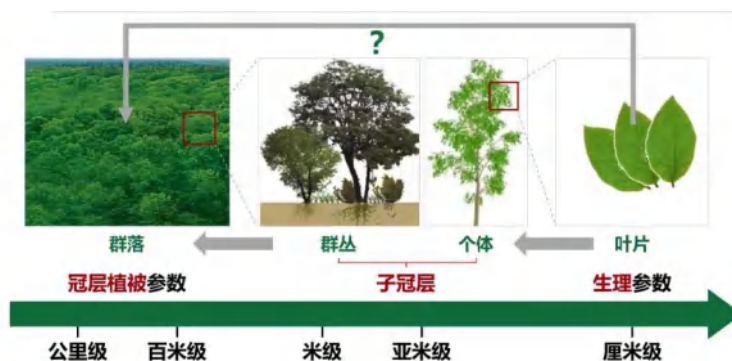


## ■ (2) 部分定义失效 (反演)

- ✓ 厘米级像元尺度上，光学属性BRDF定义失效；植被参数（如LAI）定义失效



(Schaepman-Strub et al., 2006)



(源自范闻捷老师报告)

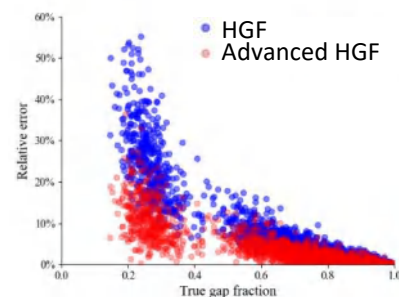
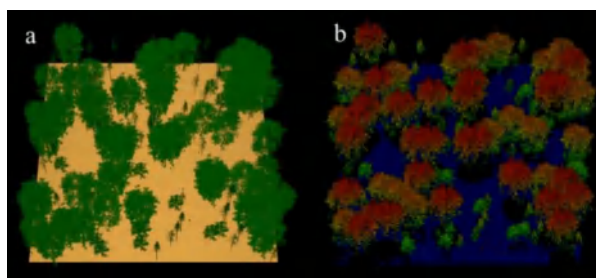
# 一 近地面航空遥感监测面临的典型问题

## ■ (3) 算法开发 (反演\量测\分类)

- ✓ 数据驱动时缺乏大量的具有足够代表性的标记数据；遥感观测数据未获取前的预实验；遥感信号解译中的敏感参数分析；



Legend Crown Background



## ■ (4) 算法性能评估 (反演\量测)

- ✓ 实测森林场景代表性有限；参考数据存在测量误差降低验证可靠性





**02**

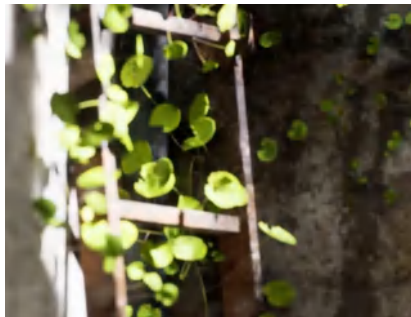
## **3D RTM革新近地面航空遥感方法**

## 二 计算机图形学中的三维辐射传输

- 想要构建高度仿真的数据，必须模拟光在三维场景中传播时的物理行为

渲染方程

$$L_r(x, \omega_r) = L_e(x, \omega_r) + \int_{\Omega} L_r(x', -\omega_i) f(x, \omega_i, \omega_r) \cos\theta_i d\omega_i$$



光线追踪

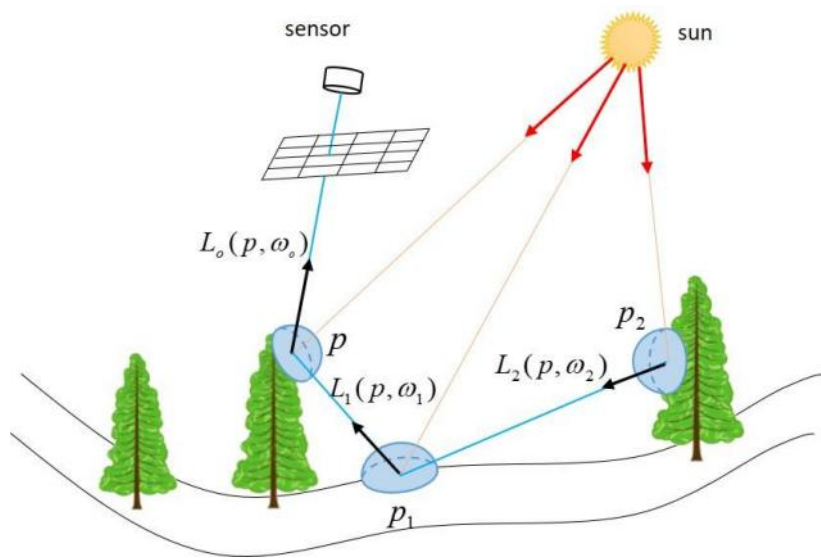
Ray-Tracing

辐射度算法

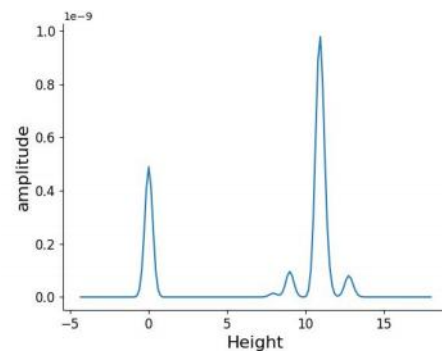
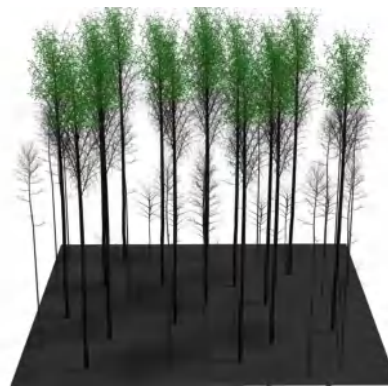
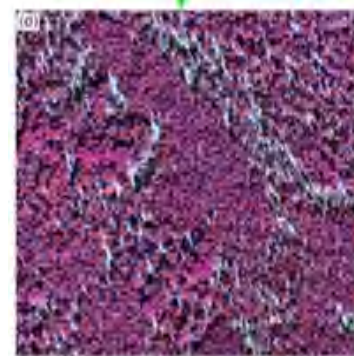
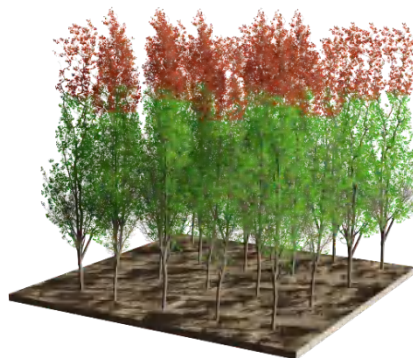
Radiosity

## 二 森林遥感里程碑式的革新：仿真树木 + 三维辐射传输模型

- 仿真的树木三维结构：OnyxTree, SpeedTree, .....
- 真实的组分光谱：叶片、枝干、土壤的反射率与透过率
- **输出：光谱影像、多角度反射因子、波形、点云**



(源自漆建波老师报告)

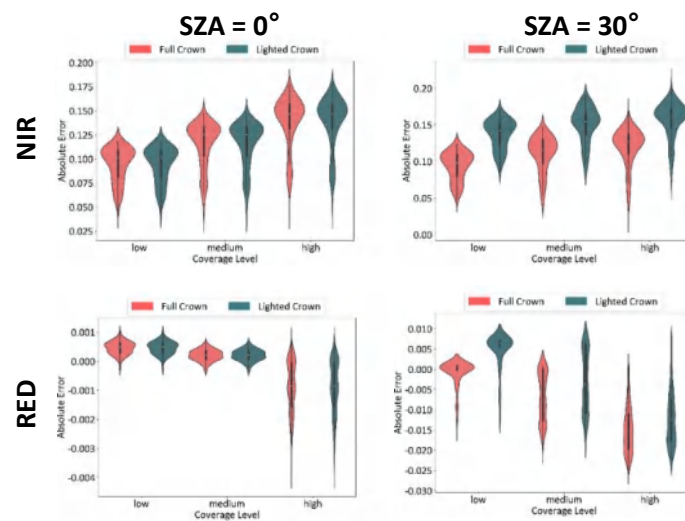
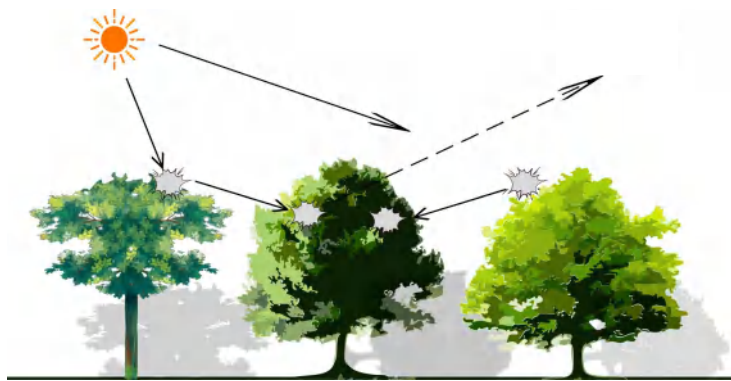


### ■ 冠层尺度一维辐射传输模型 ( 1D RTM ) 理论上并不适用于单木尺度

- ✓ 冠层尺度模型难以准确刻画光在单木中的辐射过程 (光子逸出)
- ✓ 一维模型难以充分刻画单木结构特性 (不规则树冠形状、叶片不满足泊松分布)
- ✓ 单木尺度的强邻近效应难以精细量化 (相互遮挡、交叉散射)

### ■ 单木尺度的邻近交叉散射掩盖单木自身信号，是反演误差的重要来源之一

- ✓ 邻近树木多次散射的贡献经常能够达到60%以上，且株密度越高、太阳角度越大，贡献越大



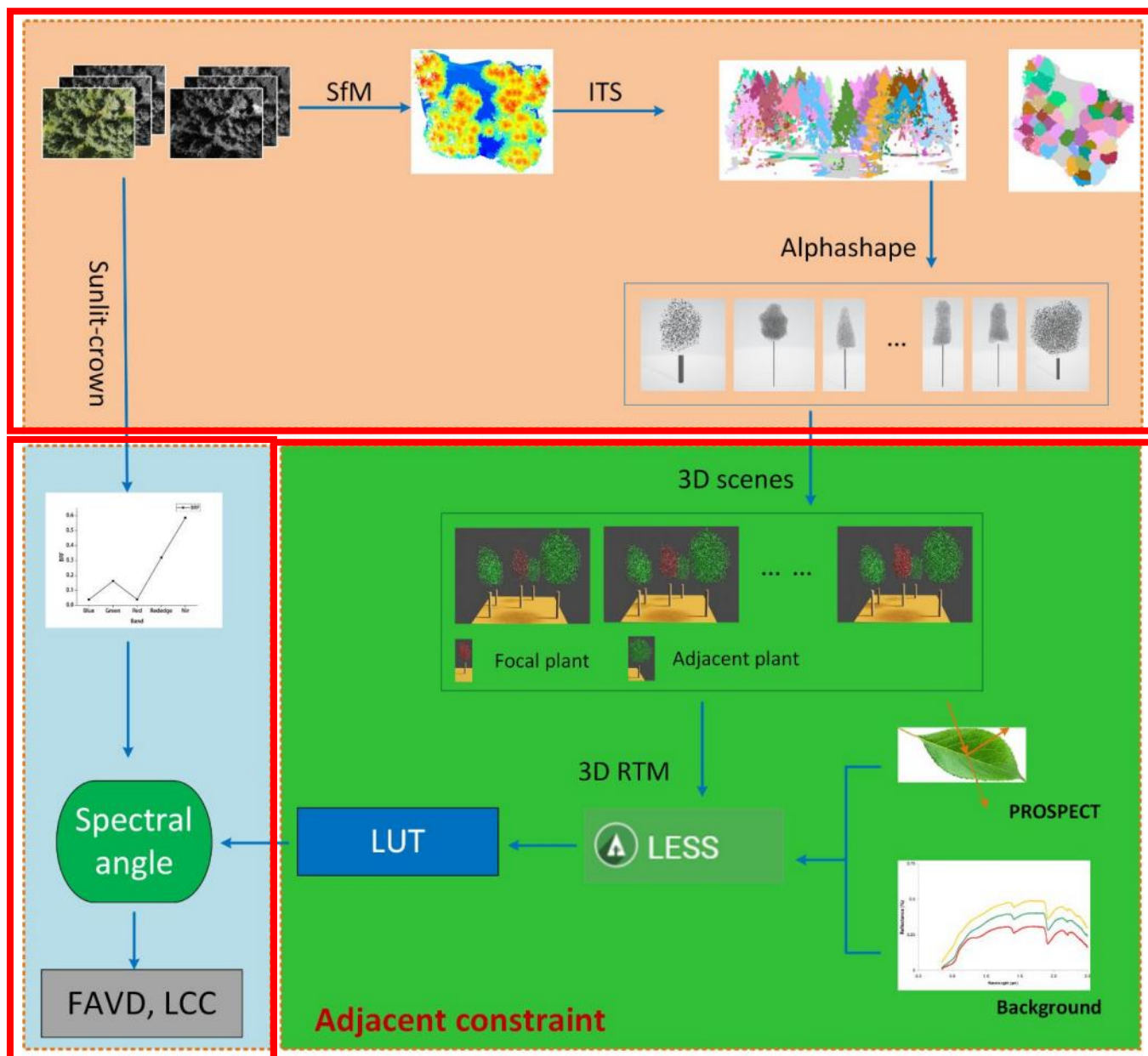
## 二 案例一、森林单木尺度的生理生化参数反演

### ■ 方法步骤

(1) 单木简化三维结构重建

(2) 目标单木邻域场景构建与光谱反射率影像模拟

(3) 查找表构建与基于光谱角的单木性状反演



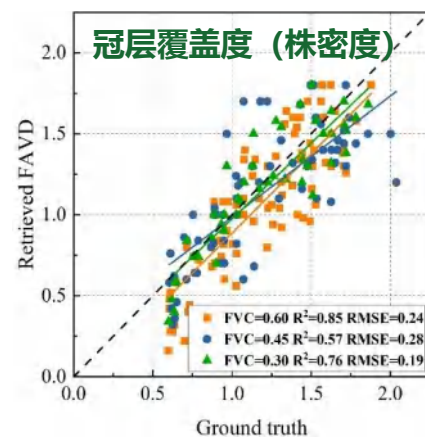
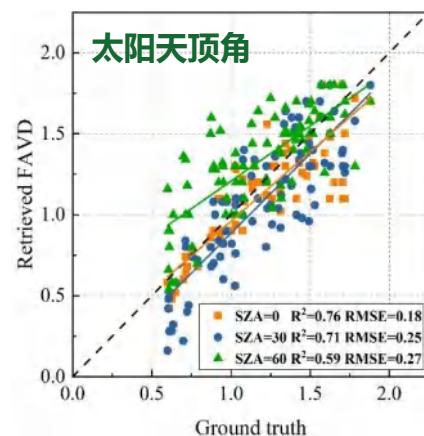
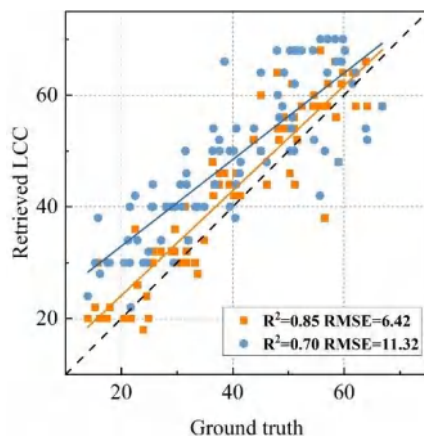
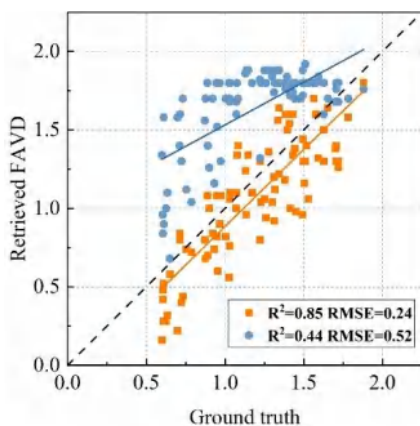
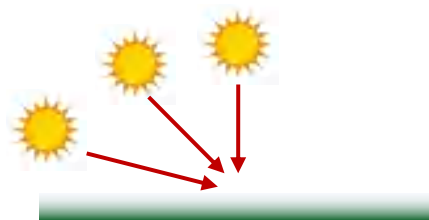
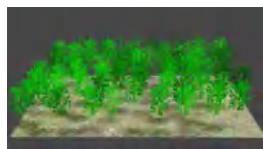
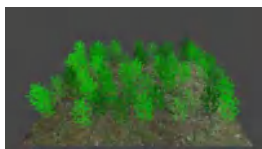
## 二 案例一、森林单木尺度的生理生化参数反演

### ■ “带邻近几何约束”的反演 vs “无邻近几何约束”的反演

✓ 相对于无约束单木反演，FAVD精度有显著提高，LCC精度有较少提高

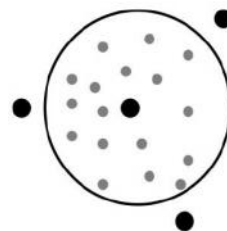
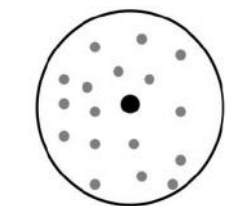
### ■ 单木尺度的生理生化参数反演性能评估

✓ 太阳天顶角越大，冠层覆盖度越高，反演精度越低

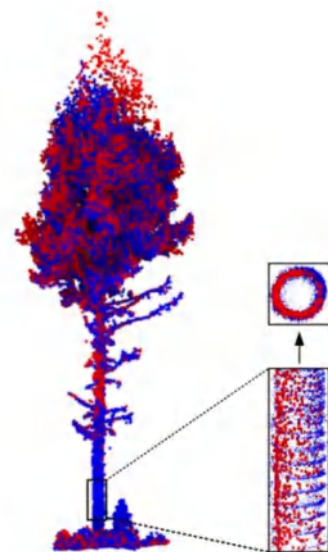


## 二 案例二、航空辅助的地基LiDAR迭代式布站策略 [点云] (算法性能评估)

- 复杂的森林结构导致树木之间的相互遮挡，TLS不得不设置多个测站方能涵盖全区。
- 测站的布设具有一定程度的任意性，不考虑样地尺度的树木生长分布模式，经验性的设置多个测站以保证涵盖绝大部分树木。
- 为便于数据后处理，多个测站的数据需要进行配准拼接。



(Liang, et al., 2018)



(Shao, et al., 2020)

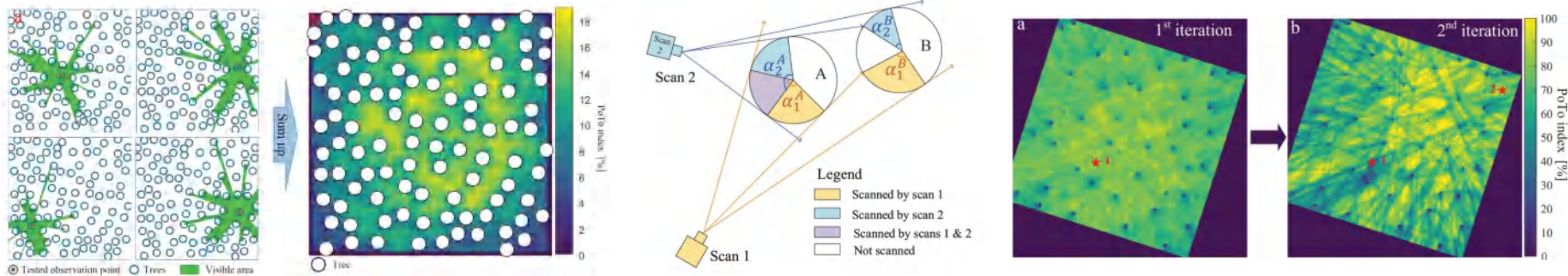
## 二 案例二、航空辅助的地基LiDAR迭代式布站策略

- 样地内单木位置图可由无人机遥感单木检测获取。
- 基于“树-树”通视分析计算PoTo index图，作为最优测站的选择依据。

$$\emptyset_i(x, y) = V_i(x, y) / N_i \cdot 100\%$$

- 计算所有待测单木的累积环闭度（CDRC）是否达到设定阈值，以确定是否需要进一步布设测站。

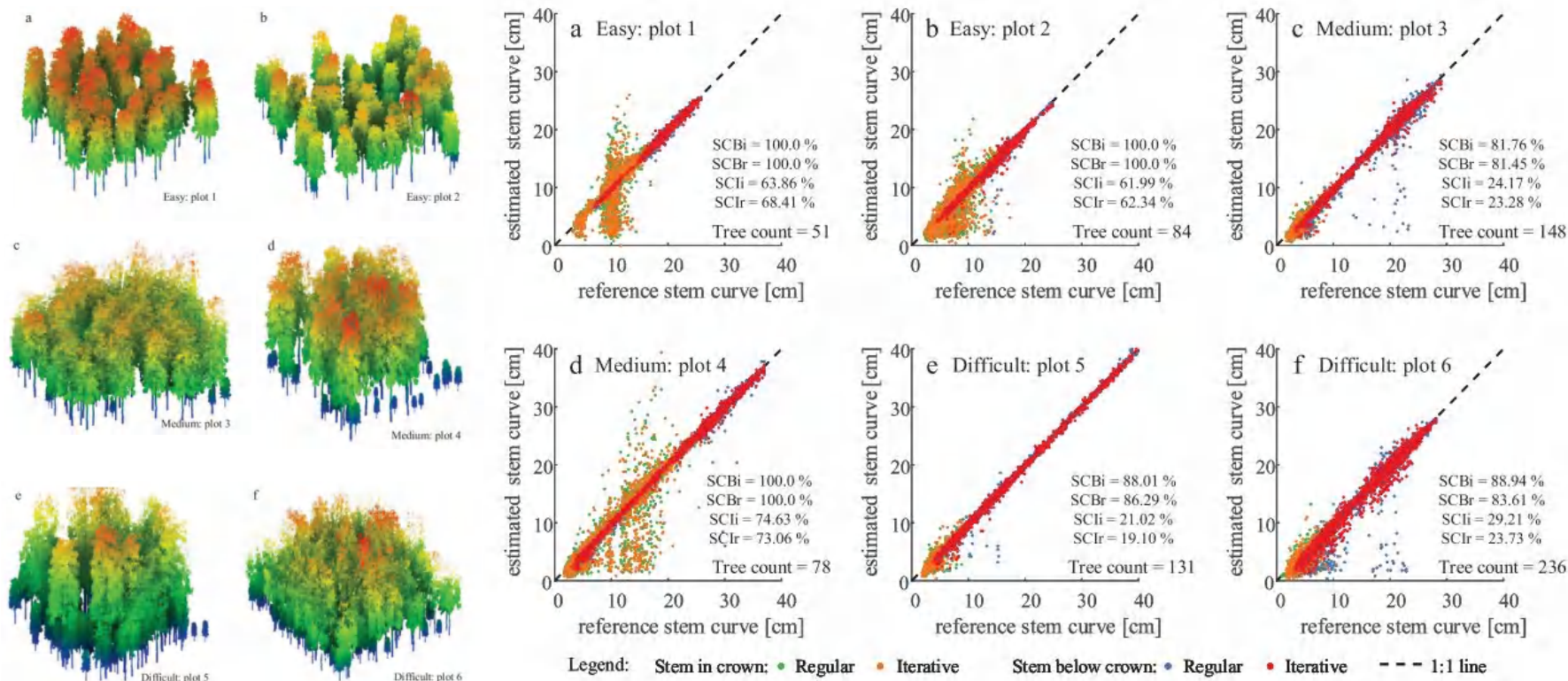
$$(x_{os}^i, y_{os}^i) = \operatorname{argmax} \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_j(x_{ec}^i, y_{ec}^i)$$





## 二 案例二、航空辅助的地基LiDAR迭代式布站策略

- 迭代式布站策略在估算单木胸径与树高参数方面，具有轻微的提升作用。
- 迭代式布站策略在估算单木干曲线、材积、树冠体积等参数方面，尤其是对于密集复杂林分，相对于规则布站策略，具有明显的优势。



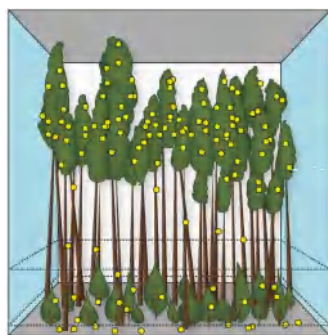
### ■ 被动光学遥感影像中上层对下层存在遮挡，阴影进一步减弱了下层信号

- ✓ 航空与卫星光学影像中林下层的贡献相对较小，难以量化反演
- ✓ 可见的林下层由于林间光照/阴影复杂性，导致其信号失真

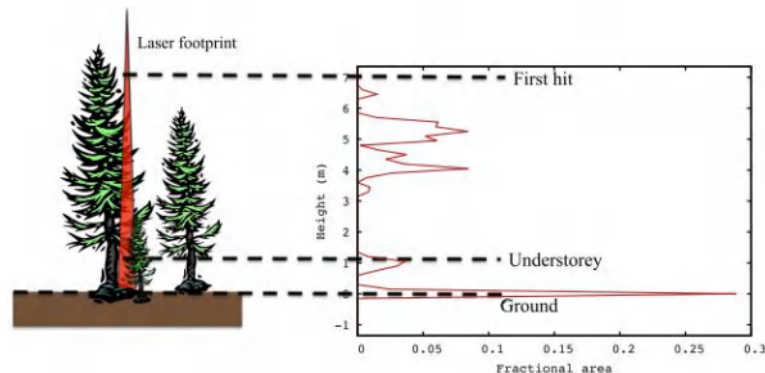
### ■ 机载离散回波LiDAR对于林下植被的表征能力不足

- ✓ 林下点云稀疏，可用的三维点与对应强度信息有限
- ✓ 构建基于回波数量或回波强度的植被指数精度较差

### ■ 机载全波形LiDAR可对森林垂直剖面进行连续表征，有潜力反演林下间隙率



(Campbell et al., 2018)



(Hancock et al., 2017)

## 二 案例三、基于全波形LiDAR的林下间隙率反演

- 波形能量本质来源于植被与土壤两个组分，借鉴像元二分构建**能量二分**

$$\text{总能量 } R = R_v + R_g \quad \text{植被总能量 } R_v = R_u + R_c$$

$$\text{下层植被与土壤总能量 } R_m = R_u + R_g$$

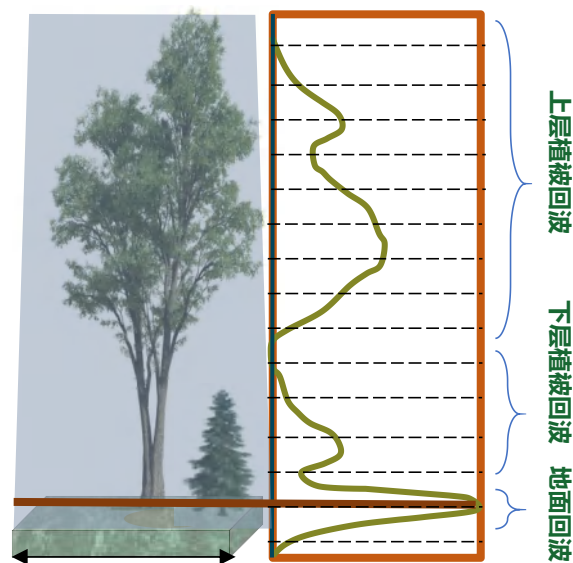
- 基于激光脉冲辐射传输简化模型，可推导

$$R_m = J_0 \rho_u P_o (1 - P_u) + J_0 \rho_g P_o P_u$$

$J_0 \rho_u$ 与 $J_0 \rho_g$ 分别林下植被与土壤的“端元”

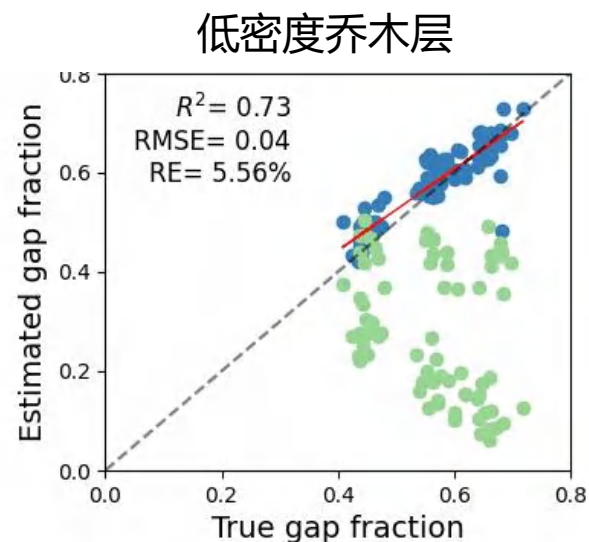
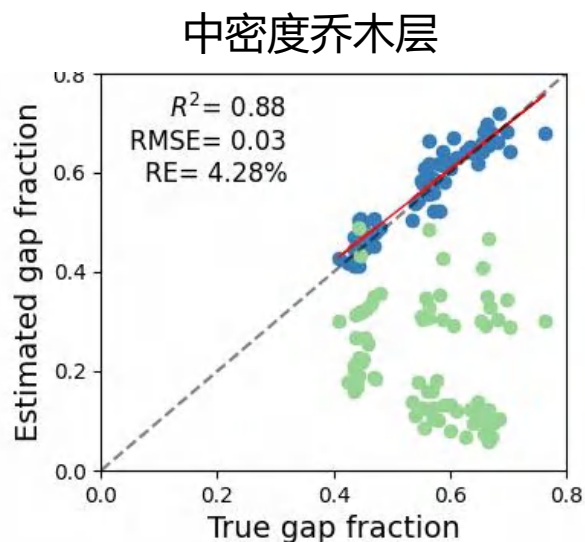
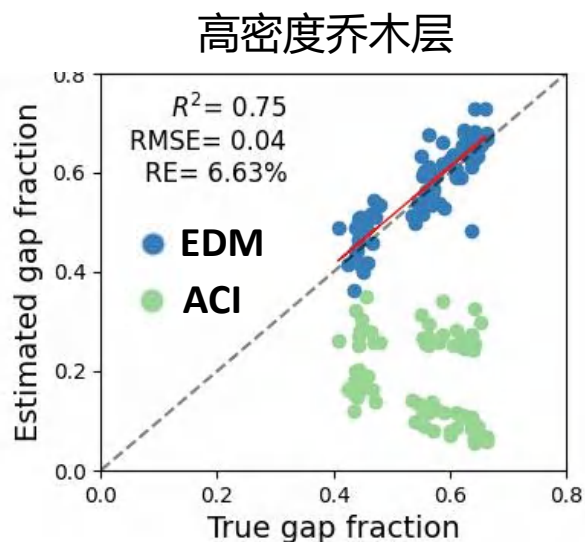
$P_o$ 为上层植被间隙率

$P_u$ 为下层植被间隙率



### 林下层间隙率反演精度评估

- ✓ 总体上，能量二分方法（EDM）相对于基于回波数量指数方法（ACI）精度有显著提高， $RMSE < 0.04$
- ✓ 乔木层存在的强遮挡效应严重降低了基于ACI的反演精度，且冠层覆盖越高，造成林下间隙率的反演精度越差，而EDM方法对此并不敏感

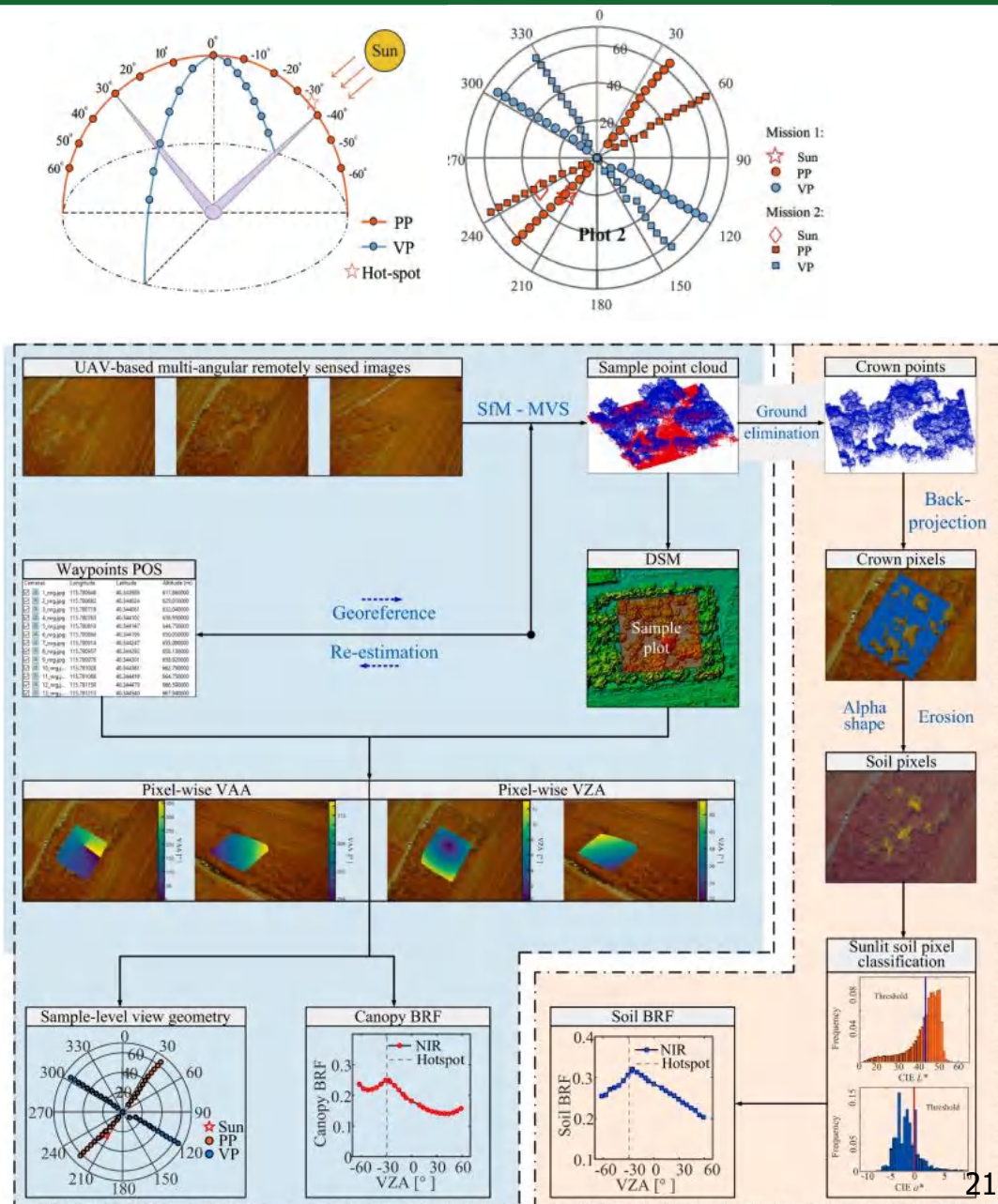


## 二 案例四、稀疏森林背景反射各向异性表征 [角度] (解译中的敏感参数分析)

- 森林背景各向异性反射因子传统上由地面多角度观测架实测获得，观测范围很小，代表性差。

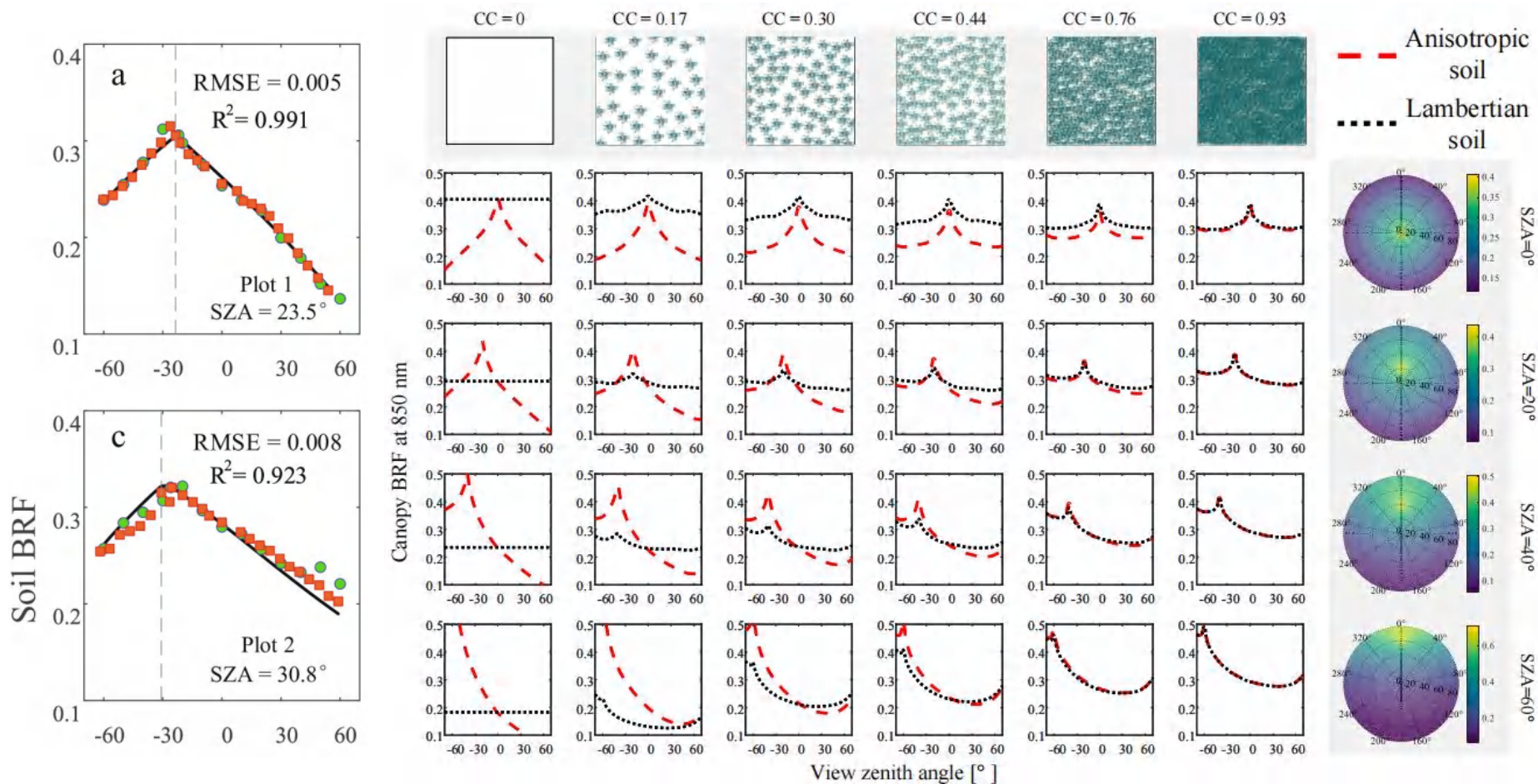
- 无人机可实现灵活便捷的多角度观测，适合森林样地尺度的冠层BRF与背景BRF的表征。

- 基于摄影测量方法，精确提取逐像元观测几何，同时准确提取同一地表范围内BRF值，获取冠层与背景各自BRF廓线。



## 二 案例四、稀疏森林背景反射各向异性表征

- 模拟发现，当森林冠层覆盖度大于0.5时，背景的各向异性反射对整个冠层的BRDF影响很小，此时可假定为朗伯背景。



**03**

**3D RTM在近地面航空遥感中的前景**

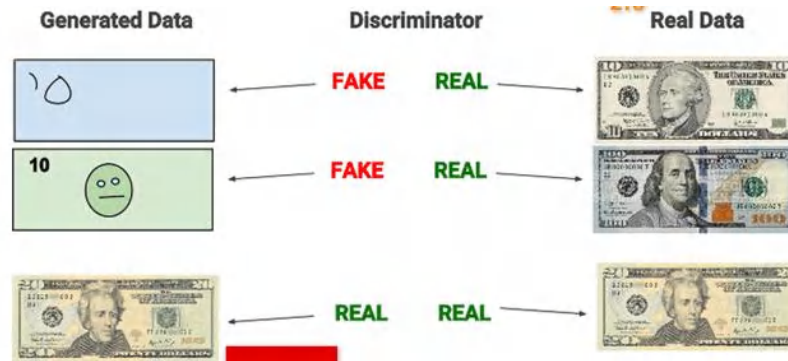
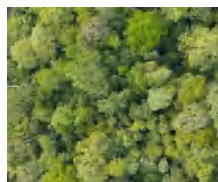
### 三 近地面航空遥感促进3D RTM的应用

- 近地面航空遥感提供的超高空间分辨率影像与点云数据，可用于3D RTM的场景构建、反演约束等



(Hu et al., 2017)

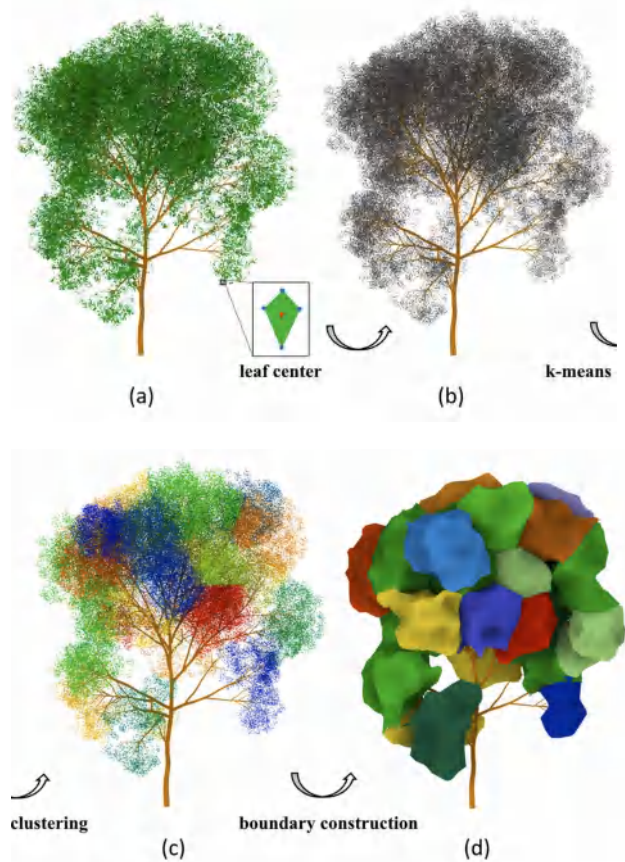
- 基于各种公开的近地面航空影像，将3D RTM生成的影像利用GAN网络仿真，构建大样本量高代表性标记数据集



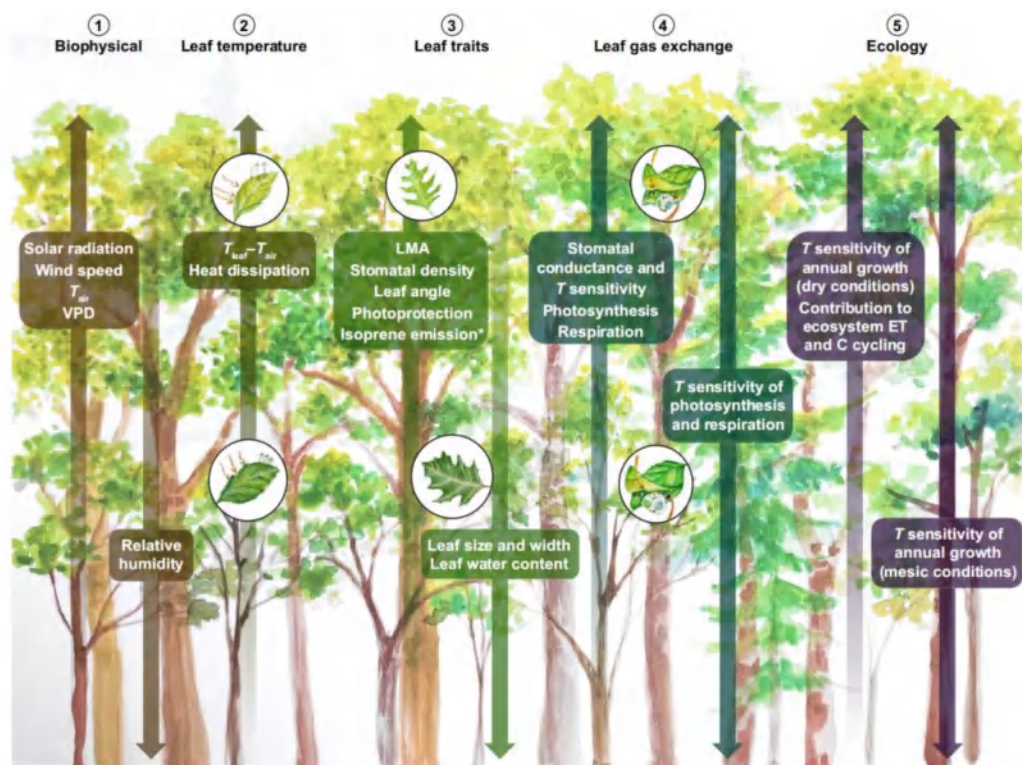


# 三 3D RTM增强了近地面航空遥感的森林精细探测能力

- 3D RTM有潜力实现树冠内部植被性状异质性的反演
- 3D RTM有潜力提升植被生化参数的反演精度



(Qi et al., 2022)



(Vinod et al., 2022)



北京林业大学

**感谢您的关注!**  
**敬请批评指正!**

<http://www.rs-lilinyuan.com/>

