



武汉大学

结合多源遥感和生态模型的森林生物量监测与预测

汇报人：黄文丽

黄文丽¹ 冯天琪¹ 沈焕锋¹
闵万坤¹ 陈玉敏¹ 胡杨² Hao Tang³

¹ 武汉大学 资源与环境科学学院

² 宁夏大学 生态环境学院

³ 新加坡国立大学 地理系

第20届中美碳联盟USCCC年会 中国·西宁 2024年7月16日-19日

SENDIMAGE





汇报提纲

1

研究背景与意义

2

结合调查和观测的森林结构参数遥感制图

3

耦合遥感和生态模型的森林生物量模拟预测

4

总结与未来工作





森林碳监测的重要性

研究背景

国家战略 —— “双碳” 目标

- “中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**，努力争取**2060年前实现碳中和**”

—— 习近平



第七十五届联合国大会

卫星遥感 —— 区域到全球碳监测

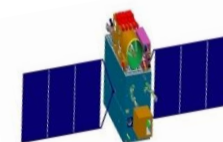
- 美国宇航局2010年设立**碳监测专项基金**
- 欧空局计划2024年发射**生物量（碳）卫星**
- 中国2022年发射**陆地生态碳监测卫星**



美国宇航局GEDI
生态系统调查卫星



欧空局BIOMASS
生物量卫星



中国陆地生态系统
碳监测CM-1卫星

SENDIMAGE



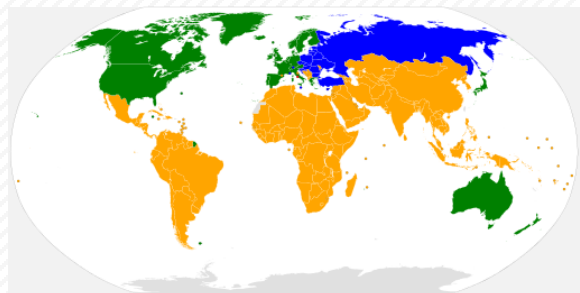


森林生态结构参数制图

研究背景



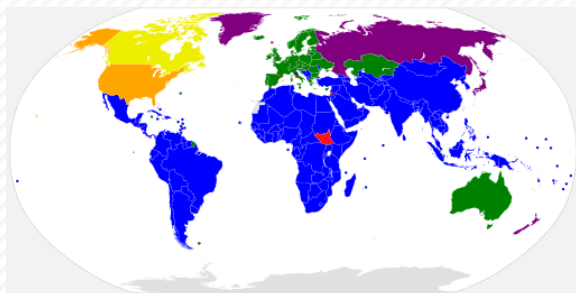
全球陆地总面积的33%



《联合国气候变化框架公约》
缔约方



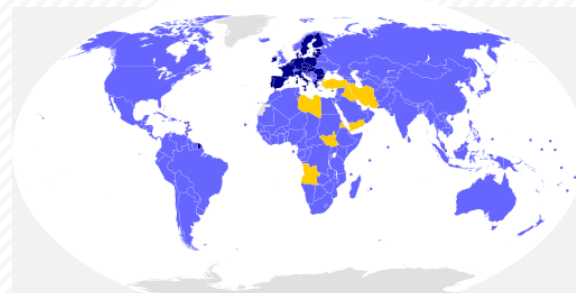
全球植被碳库的86%



《京都议定书》
缔约方



年固碳量占比超过
陆地生态系统的2/3



《巴黎协定》
缔约方

全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)将
地上生物量 (Above Ground Biomass, AGB) 定义为
基本气候变量 (Essential Climate Variable, ECV) 之一



Biosphere

SENDIMAGE

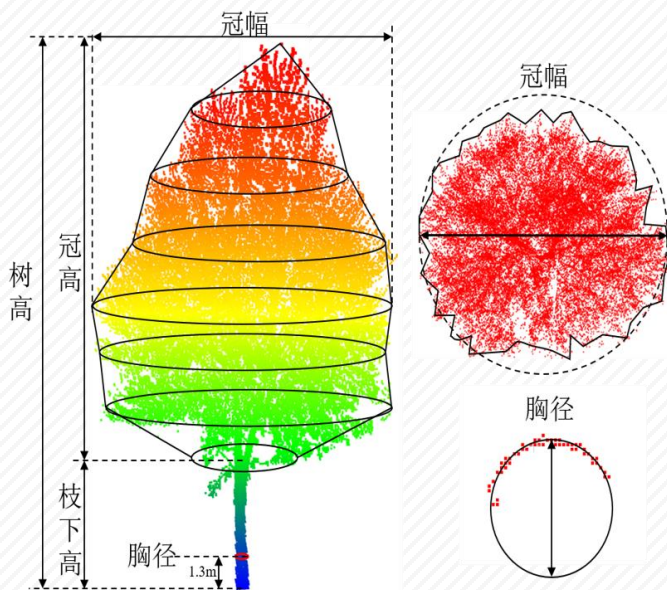




生物量Biomass 单位面积或时间积累的干物质量，一般存储在树木、灌木、藤类植物、植物根系和土壤腐殖质中 (Monk, 1972)，其密度单位是吨/公顷 (ton/ha)

- ✓ 以土壤为界，可以划分为**地上生物量AGB**和地下生物量BGB
- ✓ 以植物组织结构为依据，可分为茎、枝干、叶片、根部等各部分生物量

如何量测和估算



直接法：砍伐或采样后实验室称量 (e.g. 标准枝法; 全称重法)

间接法：量测几何及物理指标，建立计算模型 (e.g. 异速生长方程)



$$Biomass = a * DBH^b$$

$$Biomass = a * (DBH^2 * H)^b$$

重要植被结构参数

生物量转换为碳储量

$$Carbon = \alpha * Biomass \text{ (e.g. } \alpha = 0.5 \text{)}$$

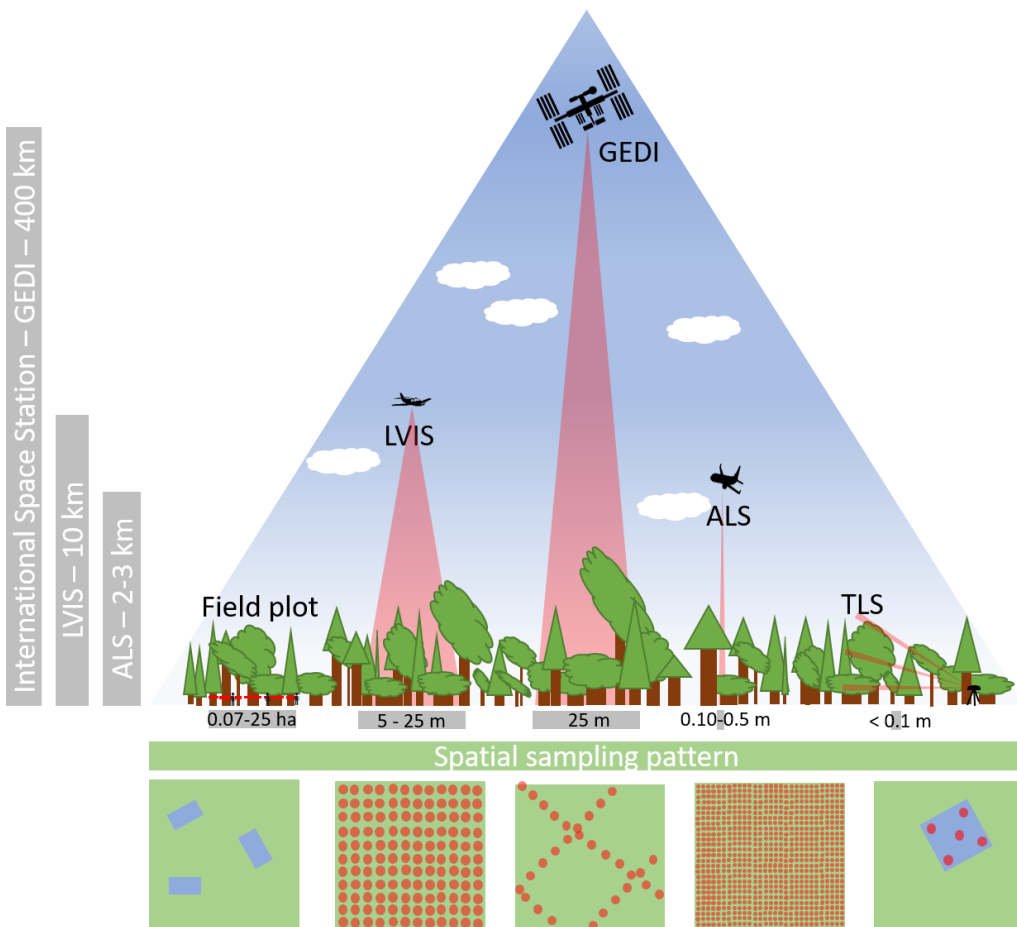




多尺度森林调查与遥感观测

研究背景

问题： 单一尺度的地面调查或遥感观测存在各自的局限性



遥感调查不连续
足印尺度数据产品

高度测量精度有限
需要进行订正

数据为有限空间覆盖
站点或样带区域产品

样本获取成本较高
人工调查观测费时费力

<https://gedi.umd.edu/science/calibration-validation>

SENDIMAGE





森林生物量监测与预测

目标思路

① 森林结构高精度遥感反演

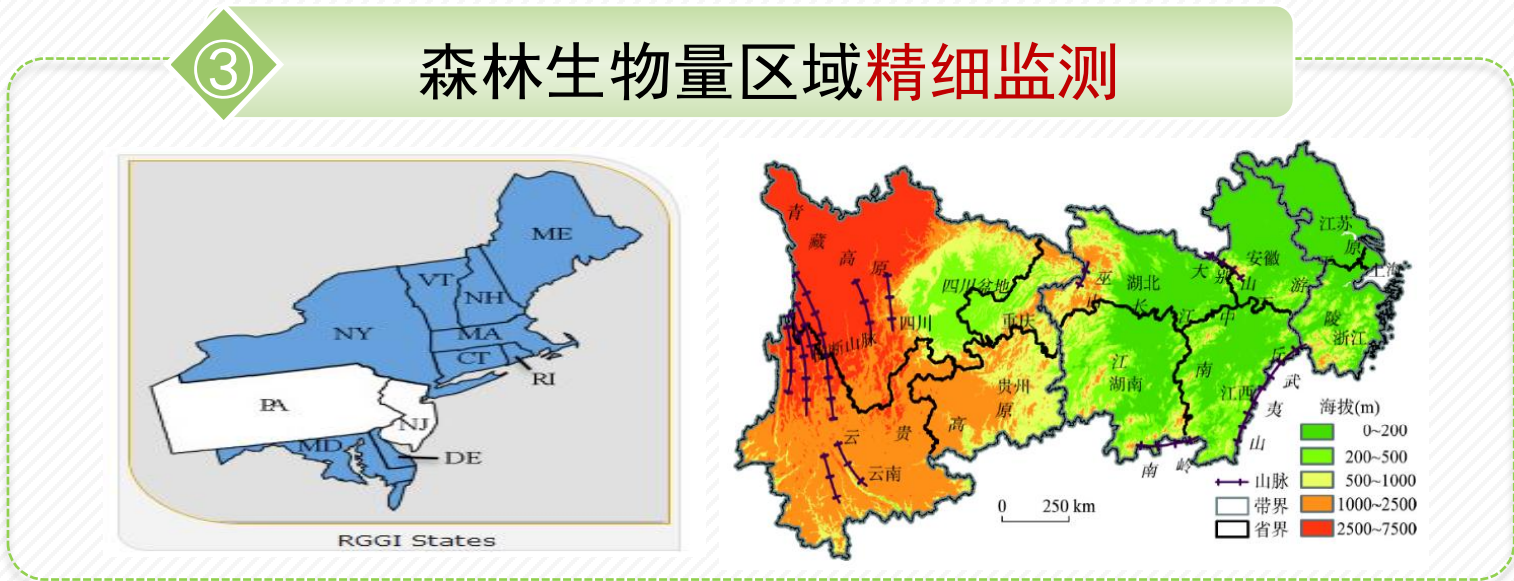


② 森林生态过程模拟预测

✓ 空间连续

✓ 时间连续

✓ 多尺度应用





2 结合地面调查和多源观测的森林结构参数遥感制图

Huang W*, Dolan K, Swatantran A, Johnson K, Tang H, O'Neil-Dunne J, Dubayah R, Hurtt G. (2019). High-resolution mapping of aboveground biomass for forest carbon monitoring system in the Tri-State region of Maryland, Pennsylvania and Delaware, USA. *Environmental Research Letters*. 14(6): 095002.

丁家祺, **黄文丽***, 胡杨, 刘迎春. (2021). 基于机器学习及多源数据的湘西北森林地上生物量估测. *林业科学*. 2021, 57 (10): 36-48.

Huang W*, Min W[#], Ding J, Liu Y, Hu Y, Ni W, Shen H*. (2022). Forest height mapping using inventory and multi-source satellite data over Hunan Province in southern China. *Forest Ecosystems*. 9: 100006.

Min W, Chen Y*, **Huang W***, Hao Tang, Rui Xu. Incorporating of spatial effects in forest canopy height mapping using spaceborne lidar and continuous remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (under review)*.



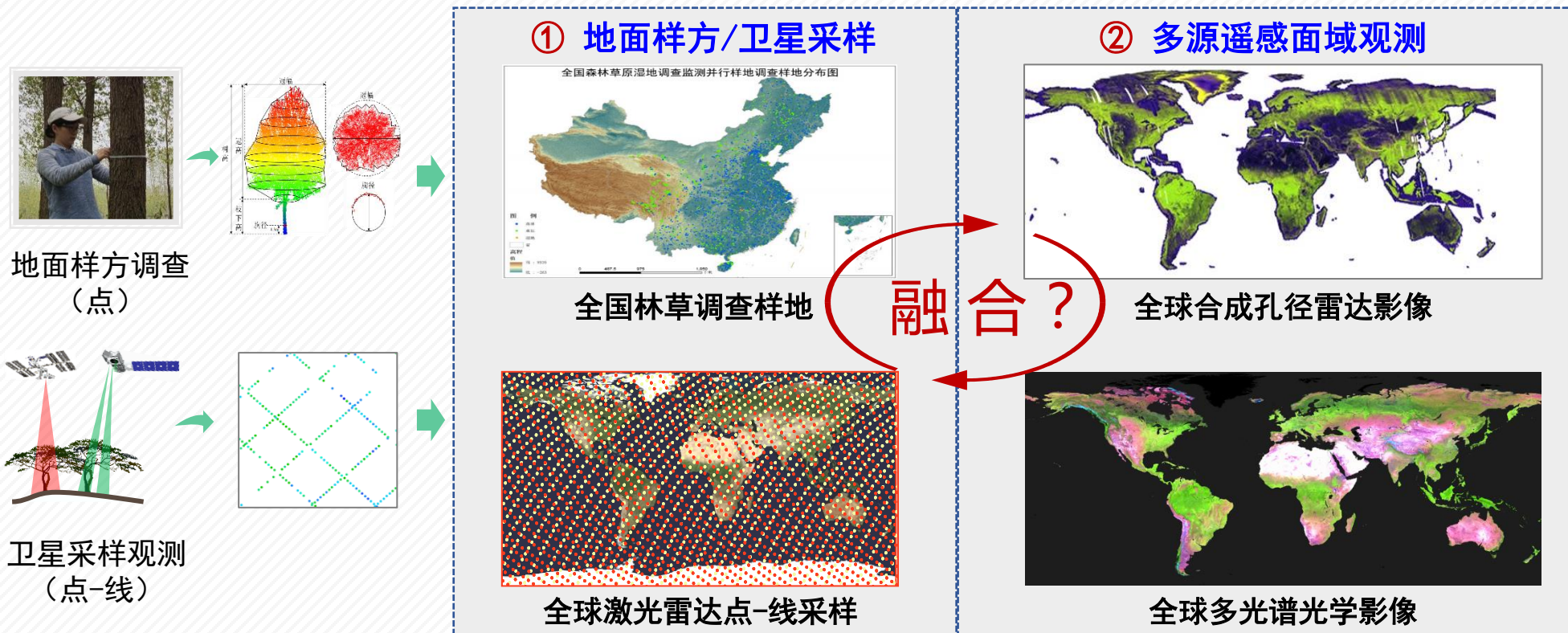


森林结构多源调查观测：存在问题及解决思路

研究背景

问 ① 地面样方/卫星采样的调查观测**精准**，但是**空间离散**呈点-线状分布

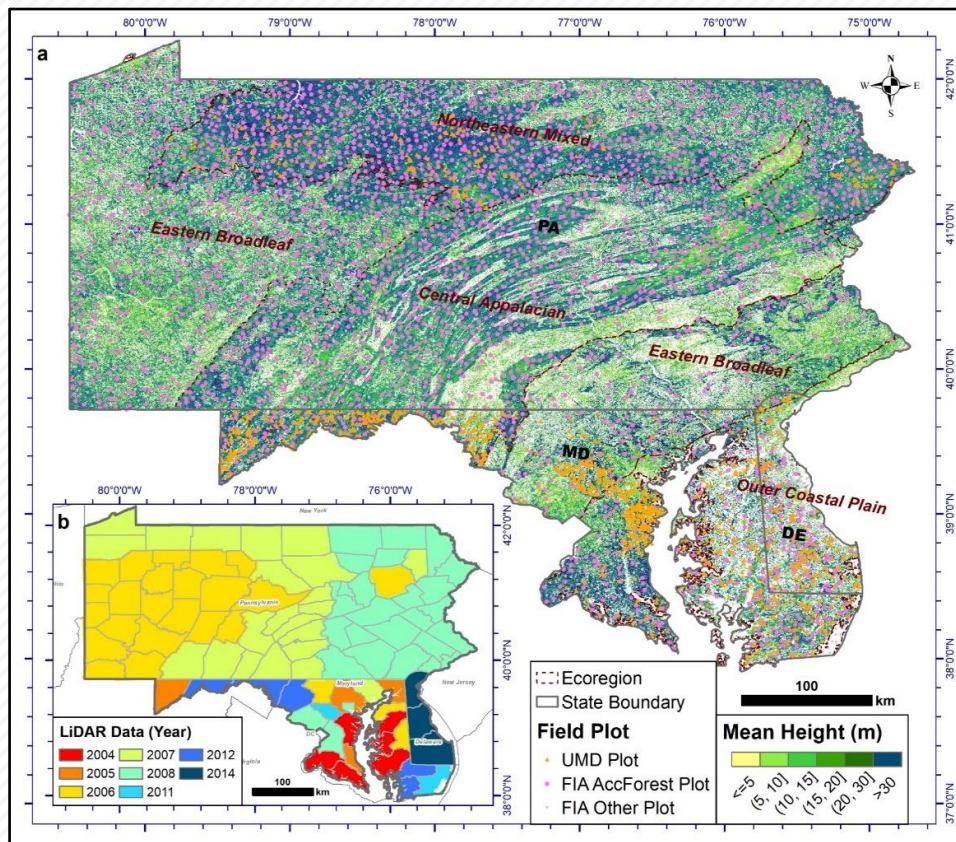
题 ② 面域卫星遥感观测**空间无缝**，但对某些关键参数**无法直接感知量测**



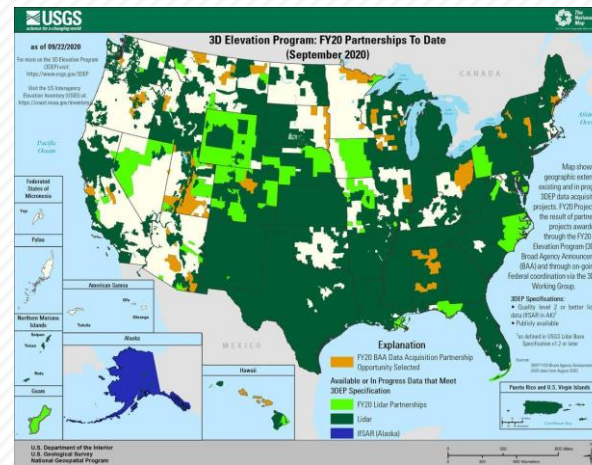
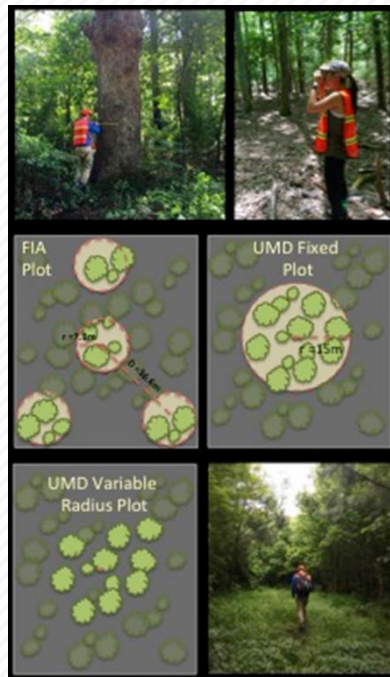


案例1：结合调查和遥感观测的美东森林结构制图

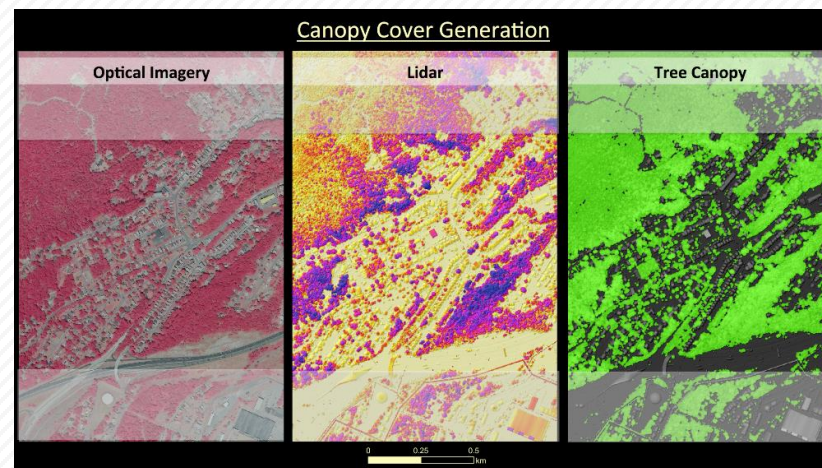
研究数据



美国东部三州(~15万平方公里)样地分布、平均树高(a)和lidar数据(b)



3DEP
地形
项目



森林植被覆盖度CC [1m]

Huang W* et al. (2019). *Environmental Research Letter*.
 Hurtt G. et al. (2019), *Environmental Research Letter*.

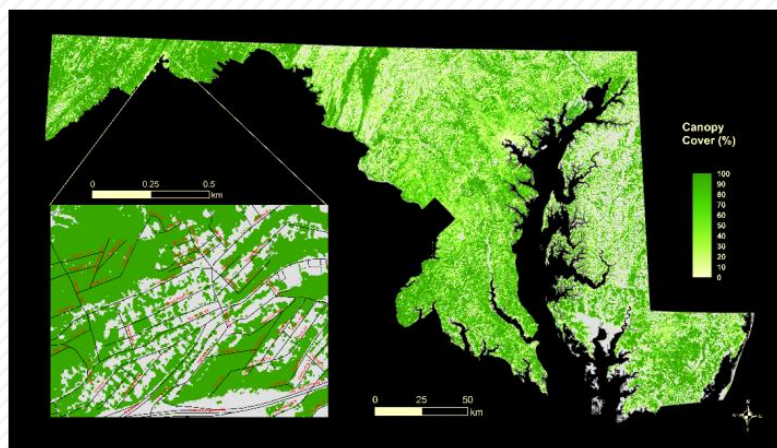




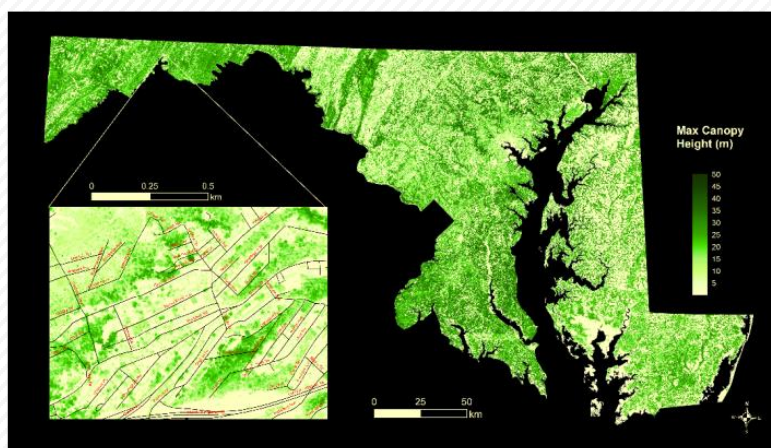
案例1：结合调查和遥感观测的美东森林结构制图

结果分析

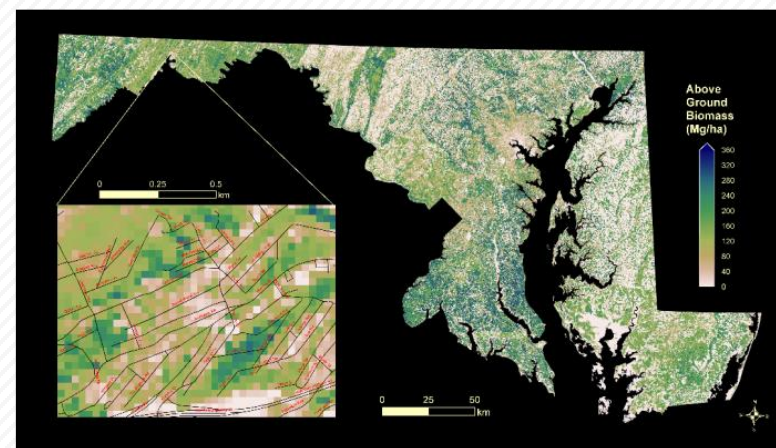
基于米级森林植被覆盖度和冠层高度分布数据，利用机器学习建模方法，绘制了30米分辨率的省级森林生物量分布



森林植被覆盖度[30m]



森林最高高度[30m]



森林生物量[30m]

Huang W* et al. (2019). *Environmental Research Letter*.

Hurt G. et al. (2019), *Environmental Research Letter*.

SENDIMAGE

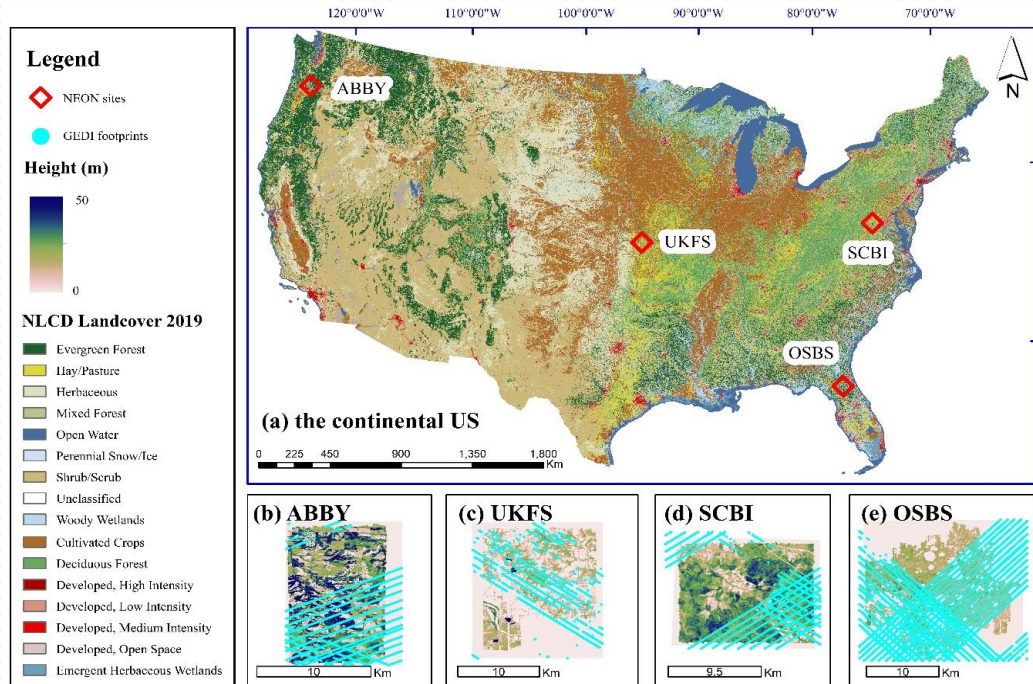




案例2：结合多源遥感NEON站点森林结构制图

研究区数据

Site	Location	Area (km ²)	Elevation (m)	Landcover/Forest Type	Climate	# of GEDI footprints
ABBY	Northwestern 45N_122W	29.9	365	Evergreen forests, grasslands, shrubs	Maritime	947
UKFS	Central 39N_95W	6.2	322	Deciduous Forest, Pasture/Hay	Temperate	324
SCBI	East 38N_78W	12.0	35	Deciduous, evergreen, woody wetlands	Temperate humid	1230
OSBS	Southeastern 38N_78W	38.5	46	Emerging herbaceous wetlands, evergreen forests, woody wetlands	Humid subtropical	2217



✓ 四个典型的NEON*站点 (2019)

ABBY, UKFS, SCBI, OSBS

*National Science Foundation's National Ecological Observatory Network

✓ 选取依据：气候、地形、森林类型

✓ 1m CHM 来自 NEON LiDAR

✓ 30m p95 (95%分位) 由 1m CHM计算





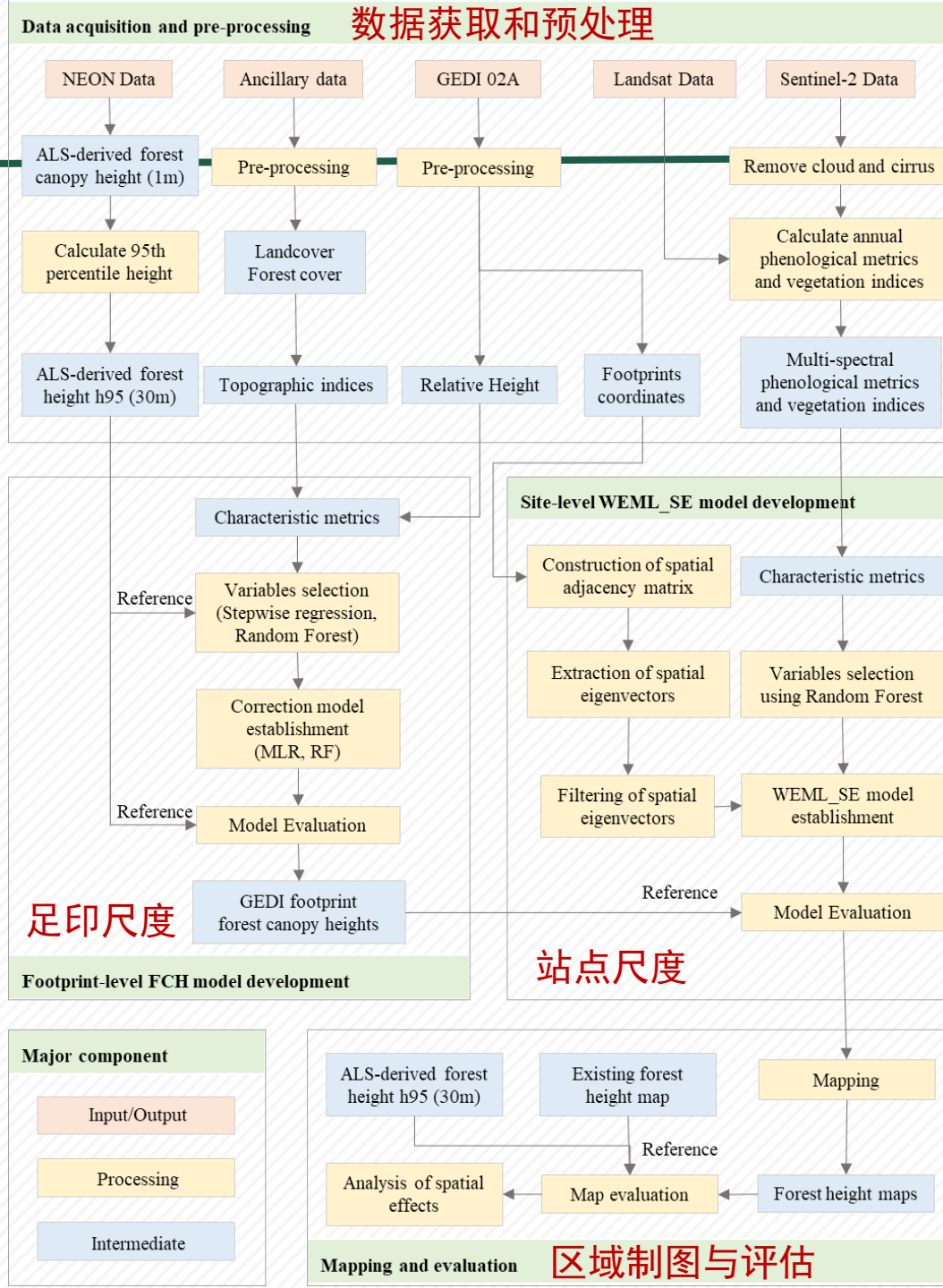
整体技术流程

研究方法

主要步骤

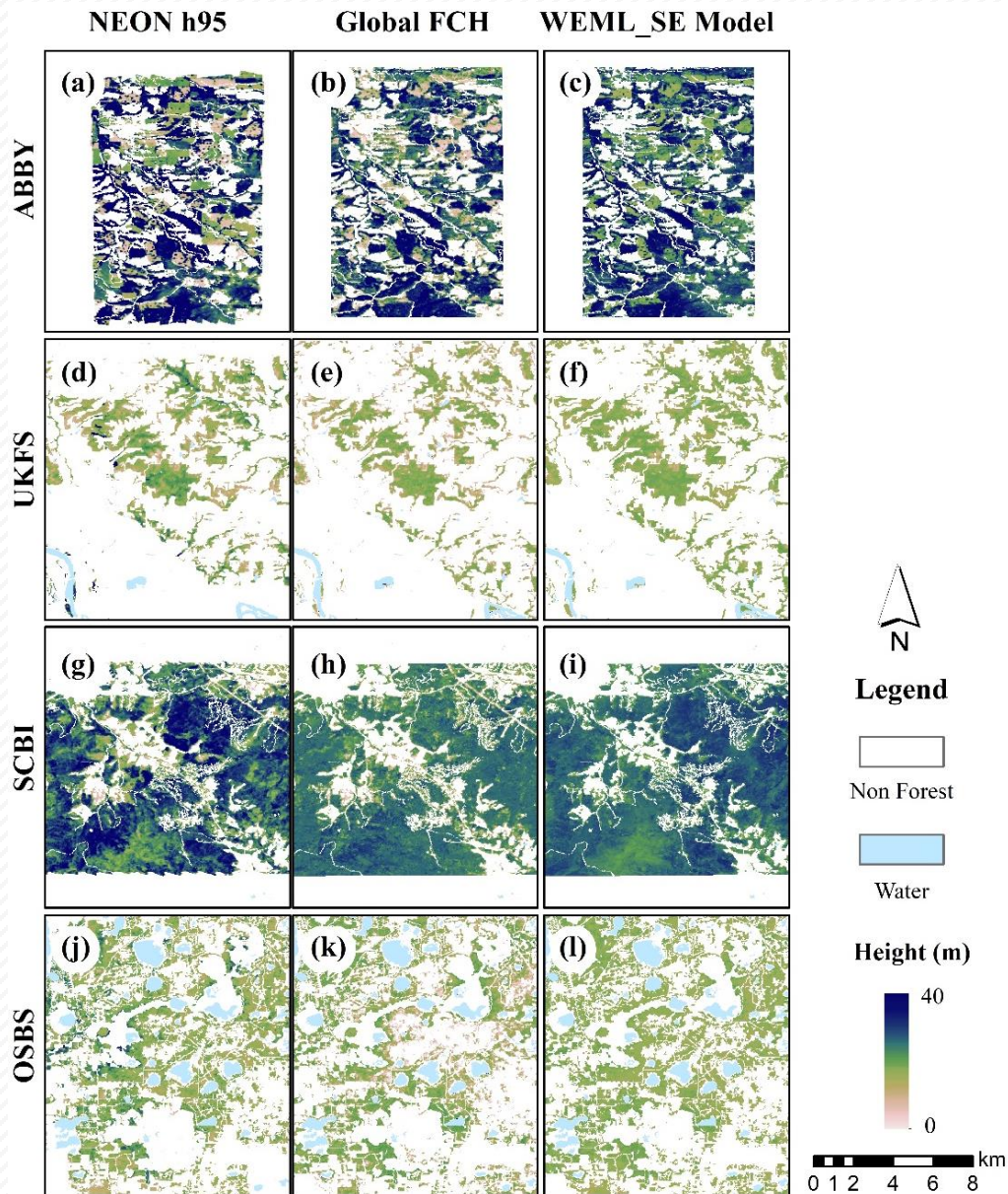
- 数据获取和预处理
- 足印尺度校正
- 站点尺度建模
- 区域制图和评估

(Min W, Chen Y*
Huang W*, et al. JAG,
 under review)



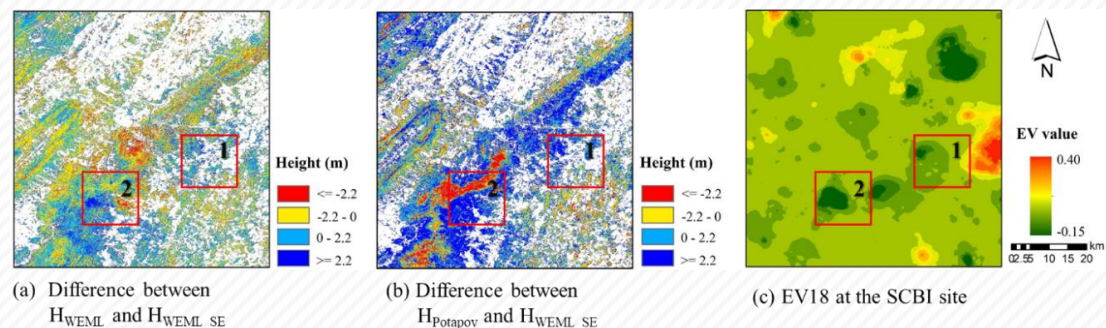


案例2：结合多源遥感NEON站点森林结构制图



四个NEON站点制图结果分析

- 多源面域空间外推森林冠层高度FCH（右）与NEON h95（左）和已有数据产品（中）空间一致性较好
- 考虑空间效应的外推模型WEML_SE，可以部分解决FCH高值低估的问题（与传统机器学习模型相比）



- 考虑(a)和未考虑空间效应(b)的森林冠层高度图差异，与EV(c)的空间分布一致
- 考虑空间效应能缓解在高值的低估现象

(Min W, Chen Y* Huang W*, et al. JAG, under review)



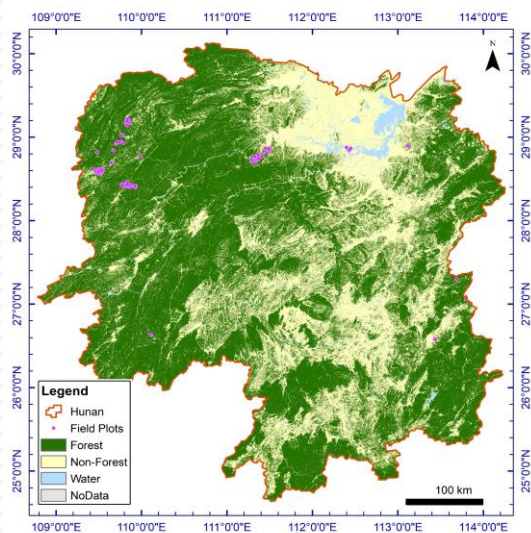


案例3：结合调查和遥感观测的湖南森林结构制图

研究数据

地面样地调查数据

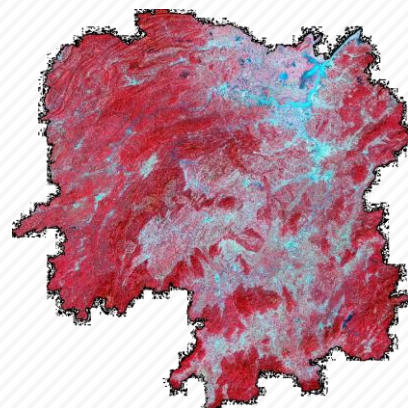
湖南省样地位置及森林/非森林分布
(来自FROM-GLC 2017数据)



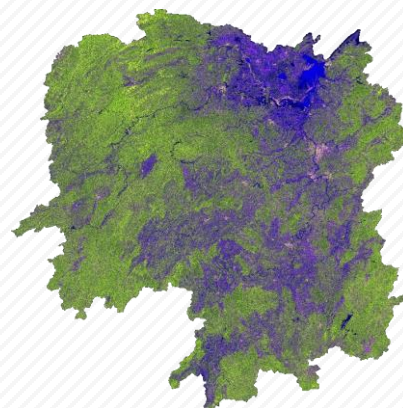
地面调查样地（单木-样地）

- AGB
- H_{avg}
- H_{baw}
- H_{max}

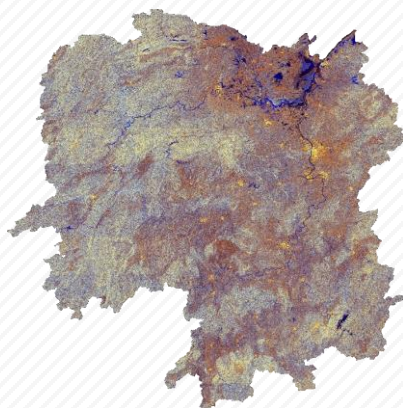
多源面域遥感数据



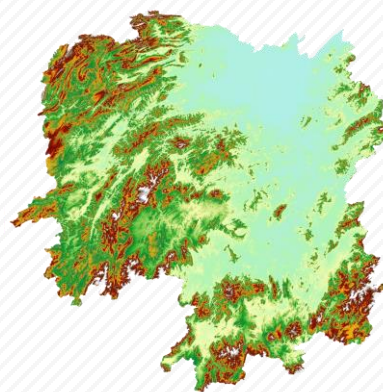
Landsat (GLAD ARD)



ALOS PALSAR-2 (JAXA)



Sentinel-1 (ASF)



DEM (SRTM)

研究区

- ✓ 湖南省

样地数据

- ✓ 532个30米样方
- ✓ 最大/平均/加权平均高

多源遥感数据

- Landsat 多光谱
- PALSAR-2、Sentinel-1 后向散射系数
- SRTM 高程/坡度

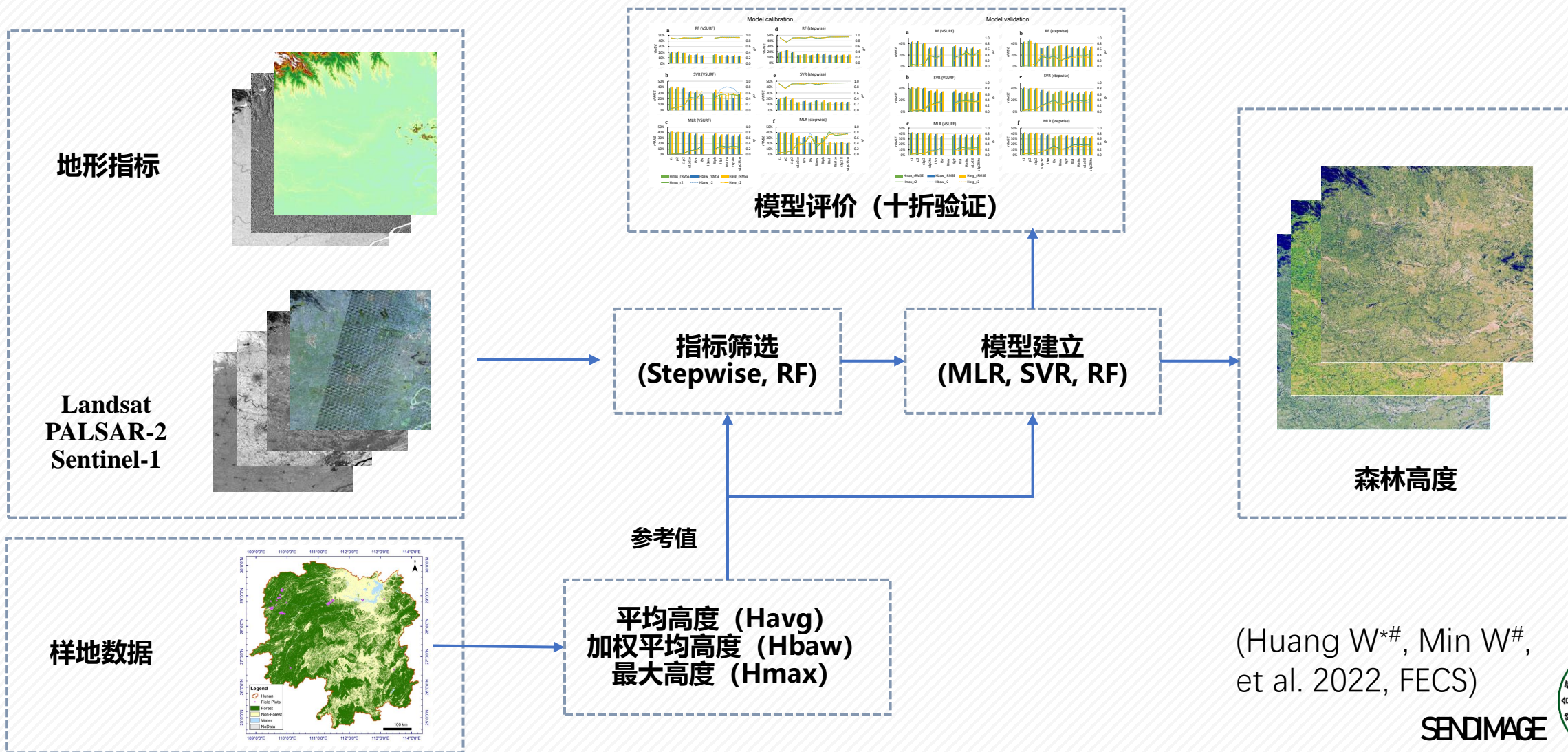
(Huang W[#], Min W[#], et al. 2022, FECS)

SENDIMAGE





案例3：结合调查和遥感观测的湖南森林结构制图



(Huang W[#], Min W[#], et al. 2022, FECS)

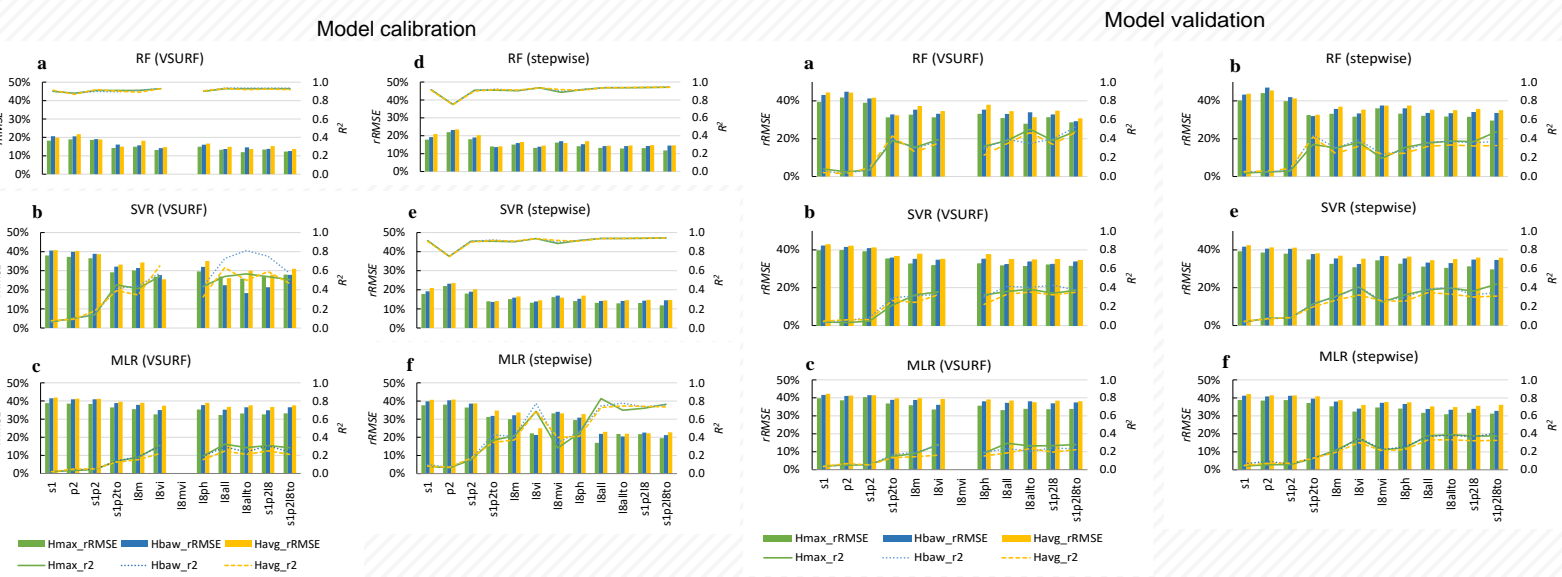
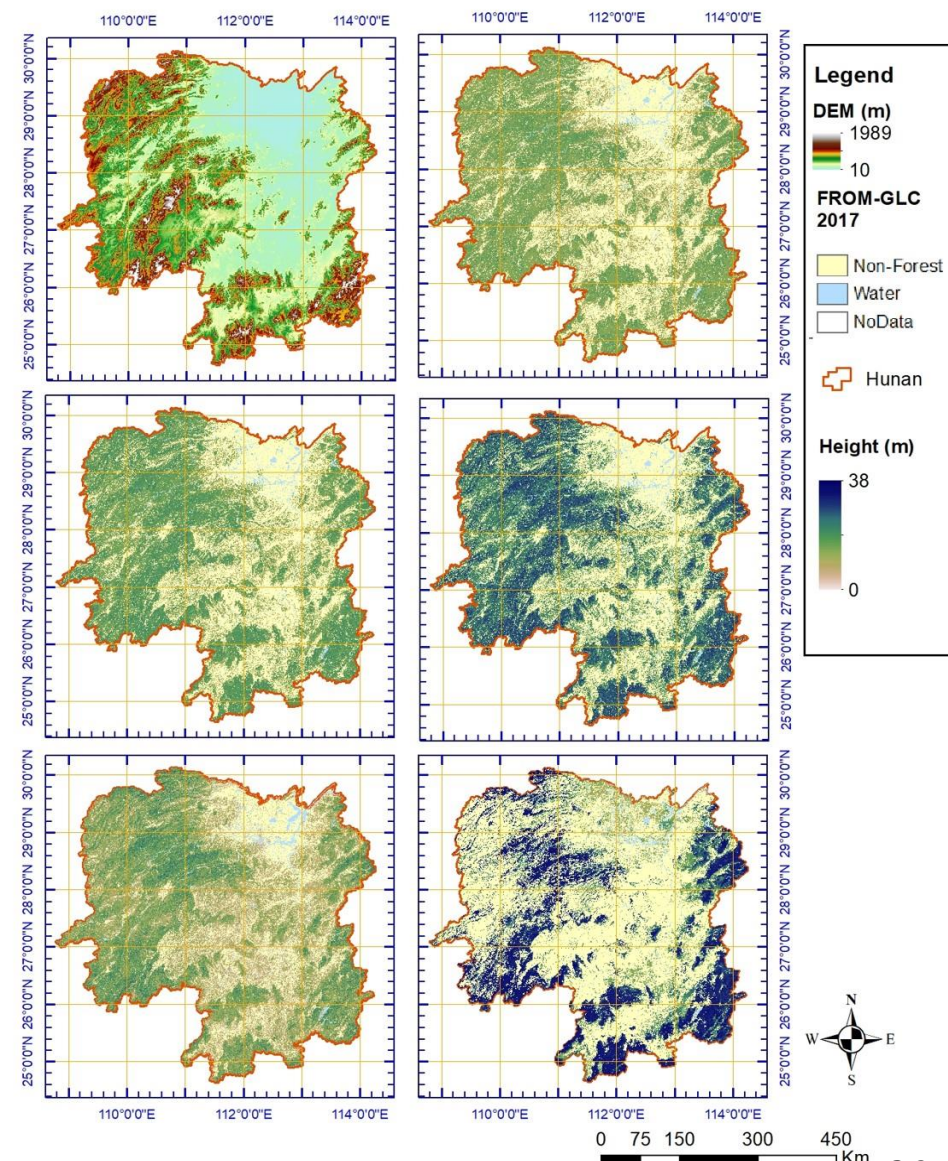




案例3：结合调查和遥感观测的湖南森林结构制图

结果分析

- **区域制图：**结合样地与卫星面域遥感数据完成湖南省30m植被高度制图
 - 绘制了最大 (Hmax)、加权 (Hbaw) 和平均 (Havg) 森林高度
- **精度评估：**MLR、RF、SVR三类统计学习模型
 - 拟合误差 ($R^2 = 0.47 - 0.52$, $RMSE = 3.8 - 5.3$ m, $rRMSE = 28\% - 31\%$)
- **产品评估：**与现有的数据产品基本一致
 - 可支持进一步按生态分区及全国范围的森林结构参数分布遥感制图





主要结论

- **特征**: 利用**随机森林**方法可选择更少且解释程度更高的特征变量
- **模型**: 使用**集成学习模型**和**考虑空间效应**可以提高森林结构参数估算精度
- **应用**: **足印/样地校正-站点外推**方法可推广应用至国家范围的森林结构参数制图

未来工作

- **站点**: **扩充测试样本/站点数量**完善对于模型迁移能力的验证
- **方法**: 探索具备**自适应和多任务**的机器学习模型
- **特征**: 尝试季节性**物候指标**、**时间因子**等敏感特征



3 耦合遥感和生态模型的森林生物量变化模拟与预测

Hurtt G*, Zhao M, Sahajpal R, Armstrong A, Birdsey RA, Campbell K, Dolan K, Dubayah R, Fish JP, Huang C, **Huang W**, Johnson K, Lamb R, Ma L, Marks R, O'Leary III D, O'Neil-Dunne J, Swantaran A, & Tang H. (2019). Beyond MRV: High-resolution forest carbon modeling for climate mitigation planning over MD, USA. *Environment Research Letters*, 14 (4): 045013.

Ma L*, Hurtt G, Tang H, Lamb R, Campbell E, Dubayah R, Guy M, Huang W, Lister A, Lu J, O'Neil-Dunne J, Rudee1 J, Shen Q & Silva C. (2021). High-resolution forest carbon modelling for climate mitigation planning over the RGGI region, USA. *Environmental Research Letters*. 16 (4) 045014.

Feng T, **Huang W***, Shen H*. Forest carbon estimation and simulation using ecosystem demography model over Hunan Province, China (*in prep.*).



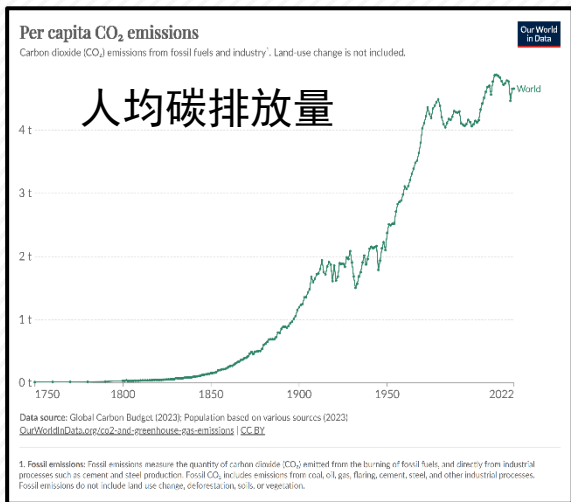


森林生物量变化过程模拟及未来预测

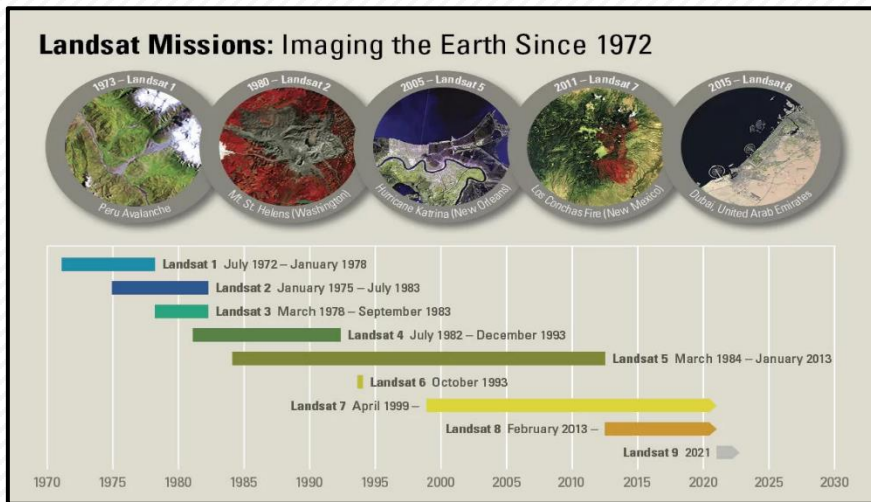
研究背景

问题： 遥感反演的瞬时估算存在**时间断续**，无法满足对于森林生物量的更长时间序**历史演替过程模拟**及**未来变化趋势预测**等需求

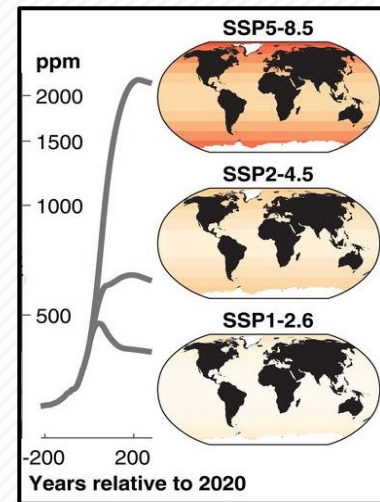
碳排放历史资料
1750s-2022



遥感空间连续反演
1972-2030...



未来气候变化情景
高/中/低场景



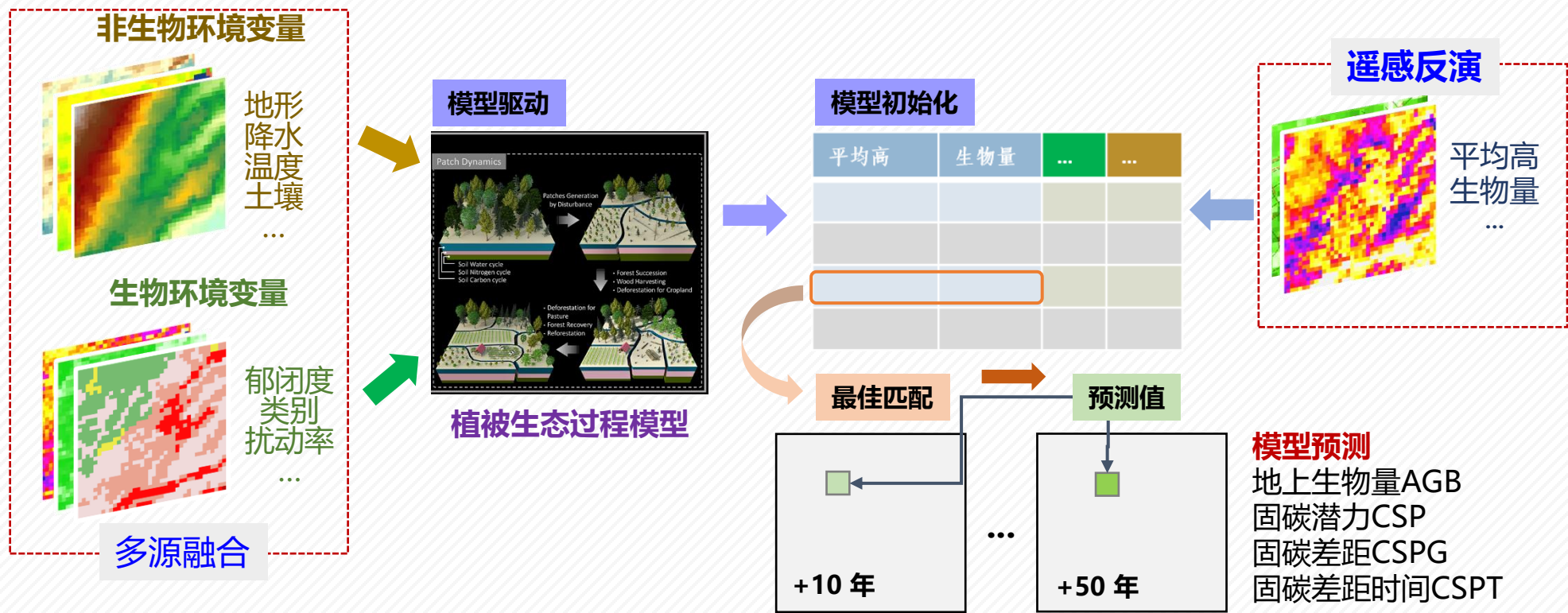
如何提升待监测生态参数的时间连续性？



森林地上生物量变化过程模拟及未来预测

解决思路

方案：融合遥感高精度反演及过程生态模型模拟结果，实现时间连续的植被碳参量历史演变模拟及未来趋势预测





森林地上生物量变化过程模拟及未来预测

解决思路

成效： 耦合多源遥感与生态过程动态模拟技术，实现了区域90米级森林生态碳汇参量的**时间连续模拟与未来预测**

研究区	原有模拟尺度	改进模拟示例	提升效果及精度评价
面积：~3.2万 km ² 90m格网：~264 万个 （相当全球0.5度47倍）			<ul style="list-style-type: none"> ✓ 空间分辨率提升 >500倍 50 km → 90 m ✓ 样地尺度验证 <i>bias</i> < 7.22 Mg/ha
面积：~10.9万 km ² 90m格网：~1000 万个 （相当全球0.5度180倍）			

美国碳监测系统专项：高分辨率碳储监测和预测系统
 国家自然科学基金：耦合多源遥感数据和生态模型的区域森林生物量反演和预测

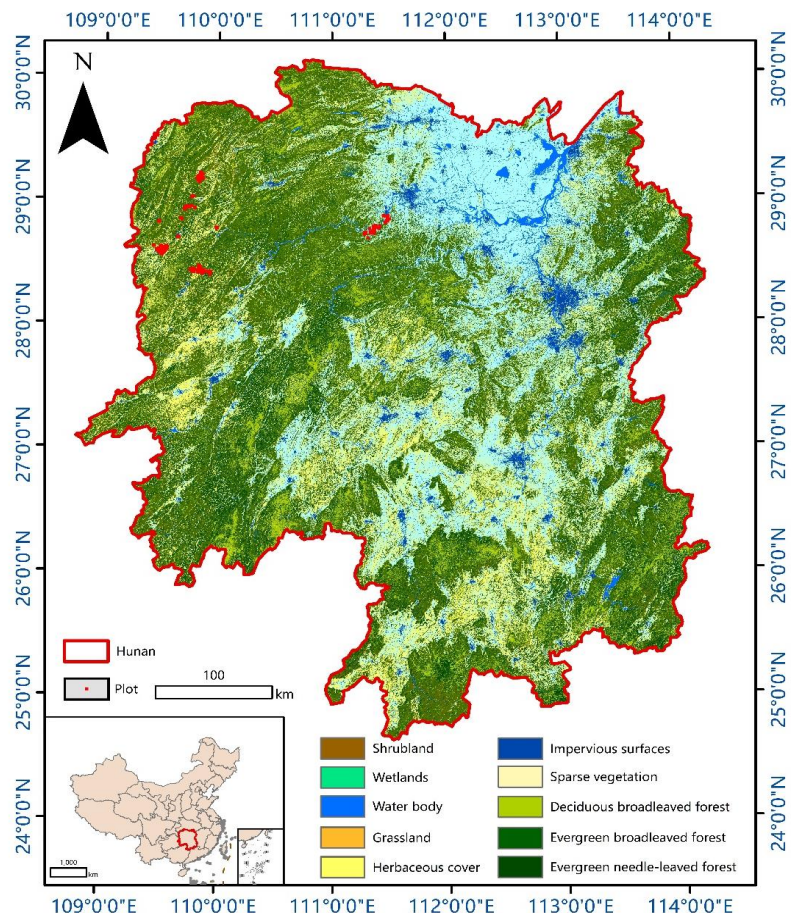




案例：湖南省森林地上生物量变化模拟与预测

研究区数据

研究区



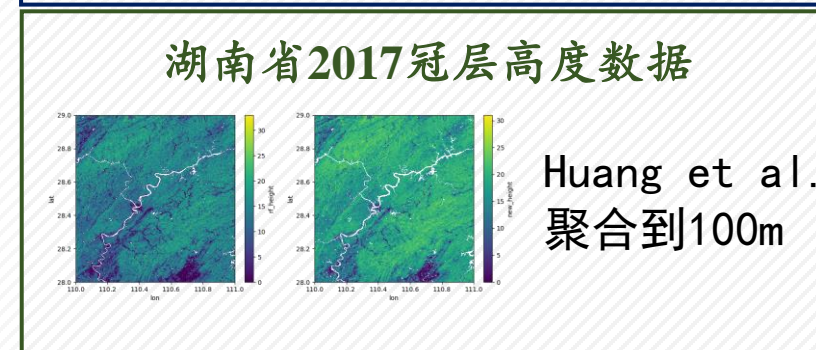
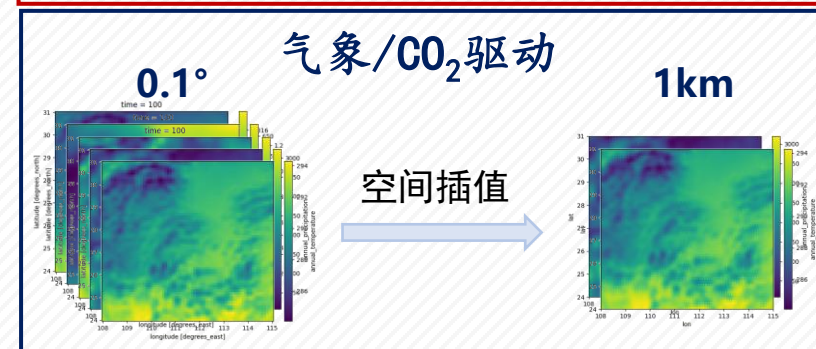
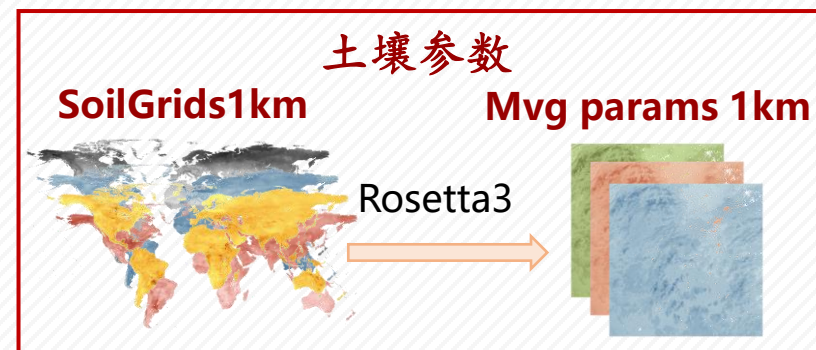
刘良云,张肖.
2020年全球30米地表覆盖
精细分类产品V1.0

湖南省森林面积占比约60%，
是我国的主要林区之一，是亚热带
和中国南方森林的典型代表

从2017年10月到2018年4月，
在研究区内的特定样地进行了森林
实地调查，获取了**500余块样地调
查数据**

高森林覆盖率和样地数据的支
持，为在湖南省开展森林碳储量模
拟与分析研究提供了有利条件

输入数据



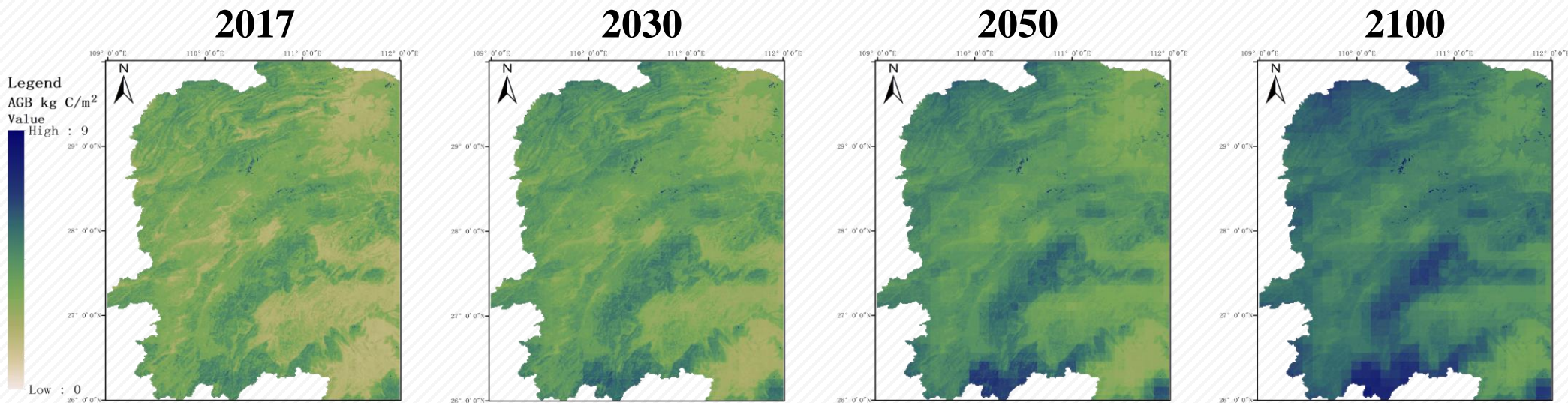
SENDIMAGE



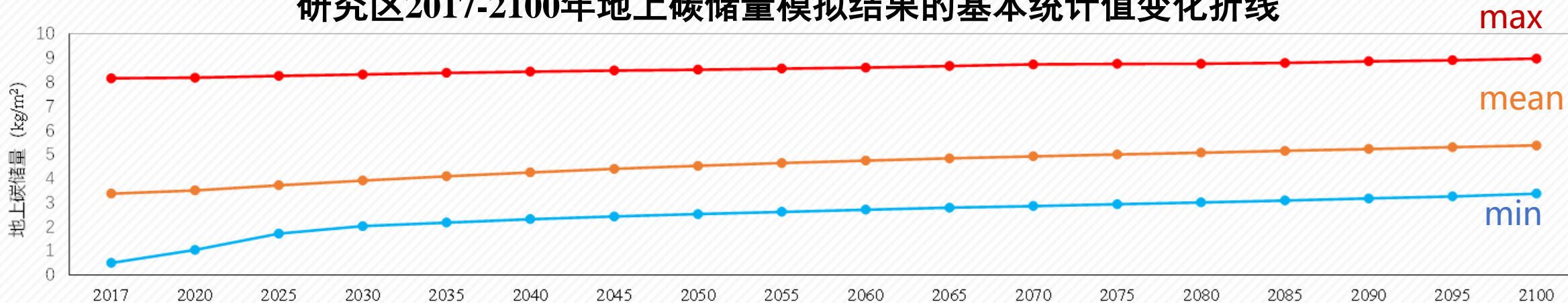


案例：湖南省西北部-1km模拟预测

结果分析



研究区2017-2100年地上碳储量模拟结果的基本统计值变化折线



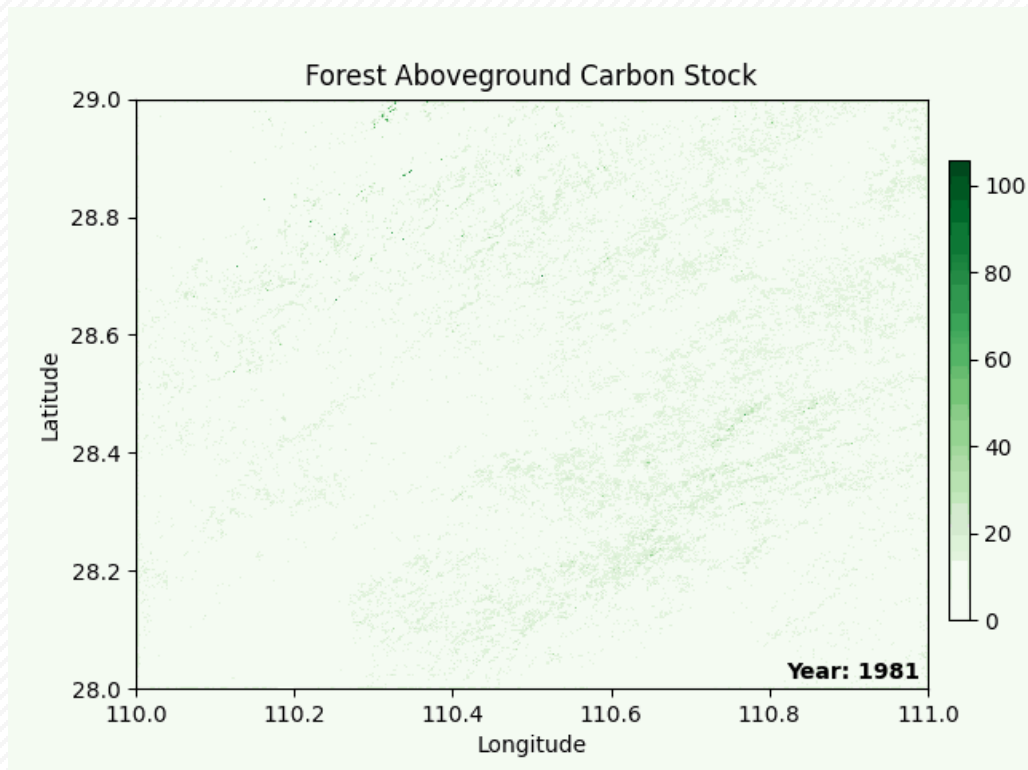
**根据模拟结果，实验区域的平均地上碳储量将在2100年
达到52.6Mg/ha(5.26 kg/m²)
与初始化年份 (2017年) 相比，约增长50%**



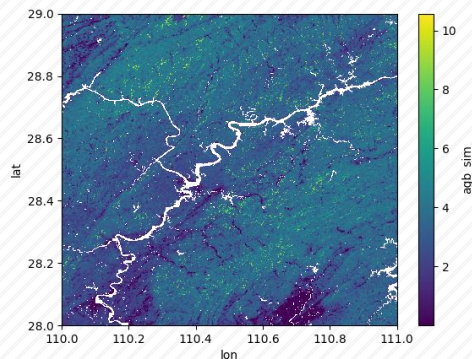


案例：区域-100m森林碳储量和固碳潜力预测

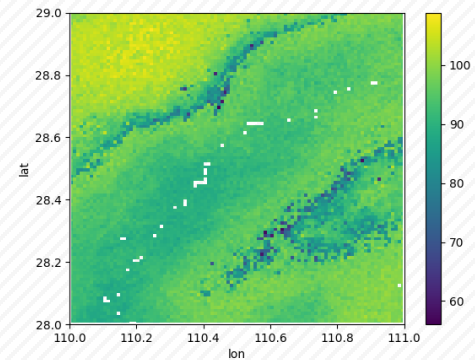
结果分析



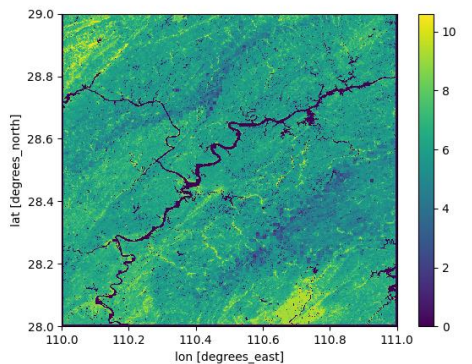
地上生物量变化



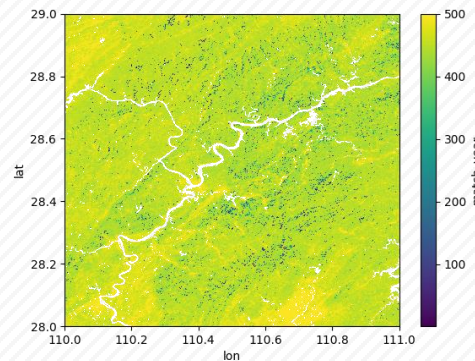
初始化地上碳储量



固碳潜力



固碳潜力差距



固碳差距时间





耦合遥感和生态模型的森林生物量变化模拟预测

结论展望

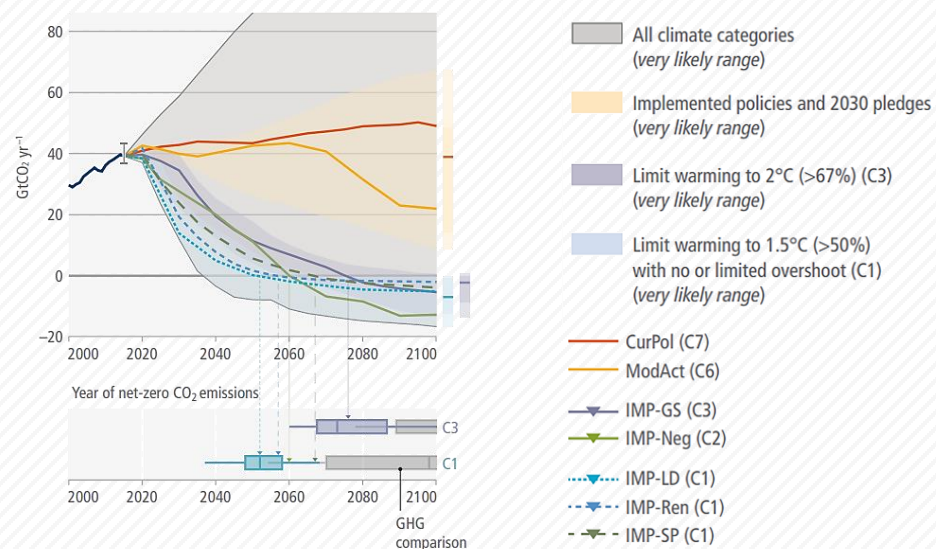
总结分析

- 以冠层高度为索引，模型能够较为准确地估算森林碳参量
- 在模拟中，平均高度饱和区间内碳参量估算的不确定性增加
- 通过机理，模型能够较准确地模拟研究区主要森林类型分布
- 人类活动干扰的影响，需要增加相应外部数据约束才能被模型捕捉
- 模型能够对研究区森林碳参量未来变化情况完成模拟预测，在变化分析、机理等方面具有独特优势

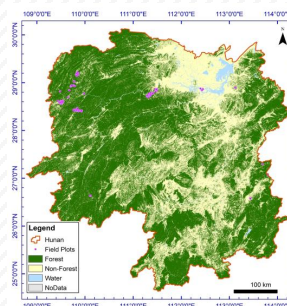
未来变化情景

共享社会经济路径-SSPs

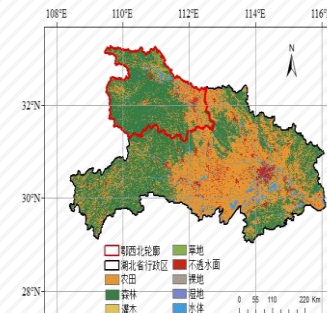
- SSP1-可持续路径
- SSP2-中间路径
- SSP3-区域竞争路径
- SSP4-不均衡路径
- SSP5-化石燃料为主发展路径



不同生态区域



湖南省



鄂西北

模型参数-约束优化

- 区域森林扰动率参数
- 本地化植被异速生长参数
- 遥感生物-非生物约束

SENDIMAGE





- **参量反演制图：主被动遥感结合进行区域森林结构参数监测**
 - 足印/波形激光雷达足印尺度监测和反演值作为参考
 - 经验算法在区域尺度用于建立结构参数反演模型
- **模型模拟应用：足印-站点-郡县-州省-跨州尺度森林碳监测与模拟**
 - 高空间分辨率森林结构和碳监测数据集支持国家尺度数据产品生产和验证
 - 耦合过程生态模型实现模拟重建历史和预测未来趋势



谢谢！ 敬请批评指正！

报告人：黄文丽

Email: wenli.huang@whu.edu.cn

美国碳监测系统专项：高分辨率碳储监测和预测系统
国家自然资源部林业局调查规划设计院 “赤子计划” (2018)
国家自然科学基金(41901351)、中央高校基本科研业务费专项资金(2042022kf1073)



国家林业局调查规划设计院
Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration

武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



北京师范大学
BEIJING NORMAL UNIVERSITY



Global Land
Analysis & Discovery

