

基于 **SMOS-IC L-VOD** 的全球森林碳储量动态监测研究

报告人：樊磊 教授

J-P. Wigneron (PI) , 李小军 , 王梦佳 , 刘向苗 , 常中兵

Philippe Ciais, Stephen Sitch, Jérôme Chave, Martin Brandt, Sassan S. Saatchi, Ana Bastos, Feng Tian, Josep Penuelas, Alessandro Baccini, Yuanwei Qin, Xiangming Xiao, Rasmus Fensholt

西南大学 · 地理科学学院
leifan33@swu.edu.cn



汇报提纲

一

背景介绍

二

SMOS-IC LVOD 产品

三

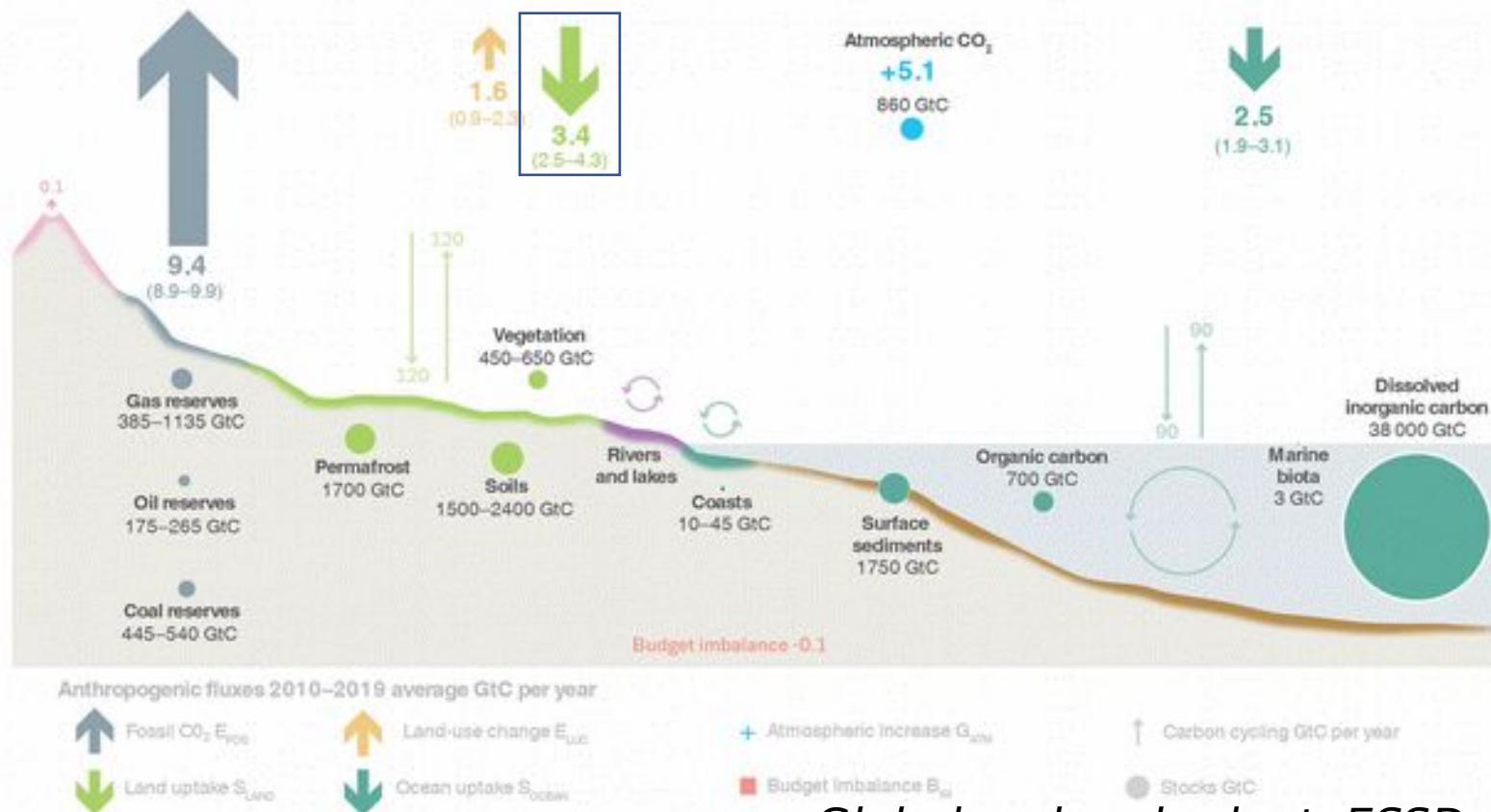
近期研究进展

四

讨论

森林碳汇是全球碳循环过程中扮演着关键角色

The global carbon cycle

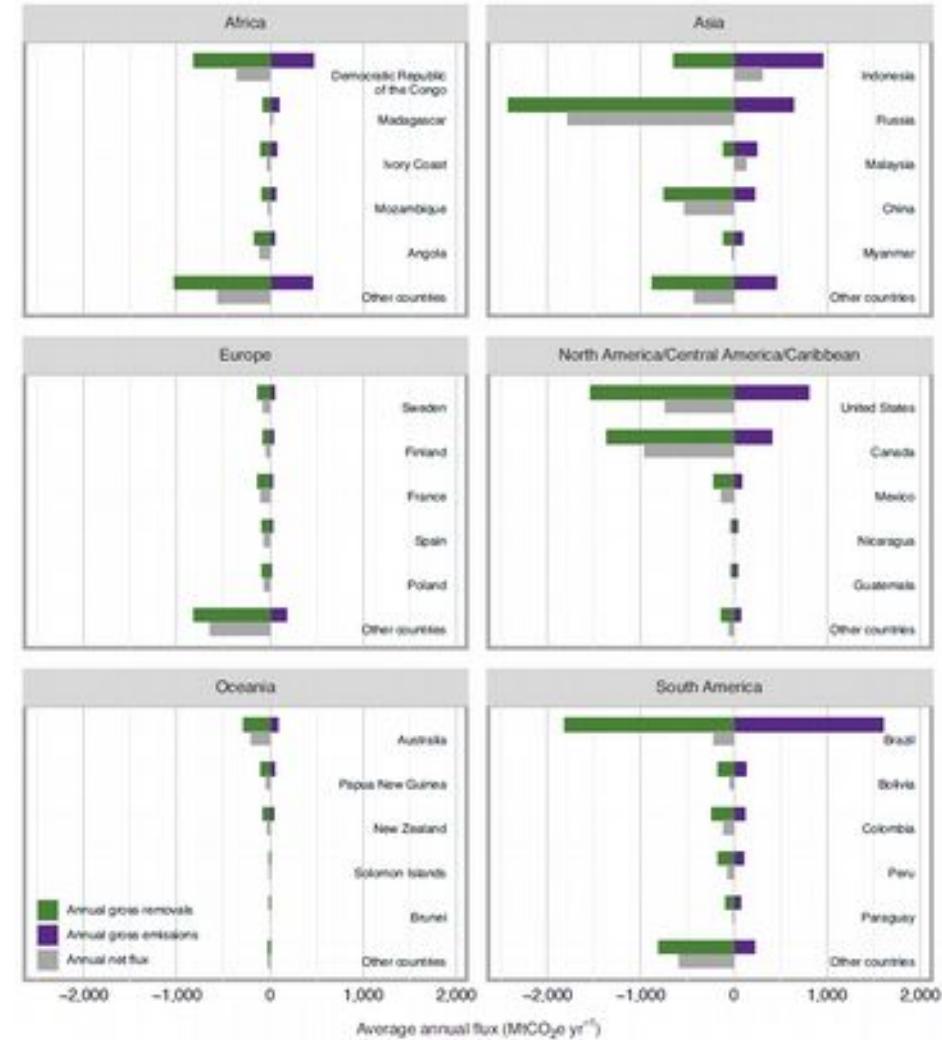


Global carbon budget, ESSD,

2020

森林碳汇是实现“碳中和”目标的重要一环

背景介绍 气候变化、森林扰动导致全球森林碳汇时空分布具有明显的差异性

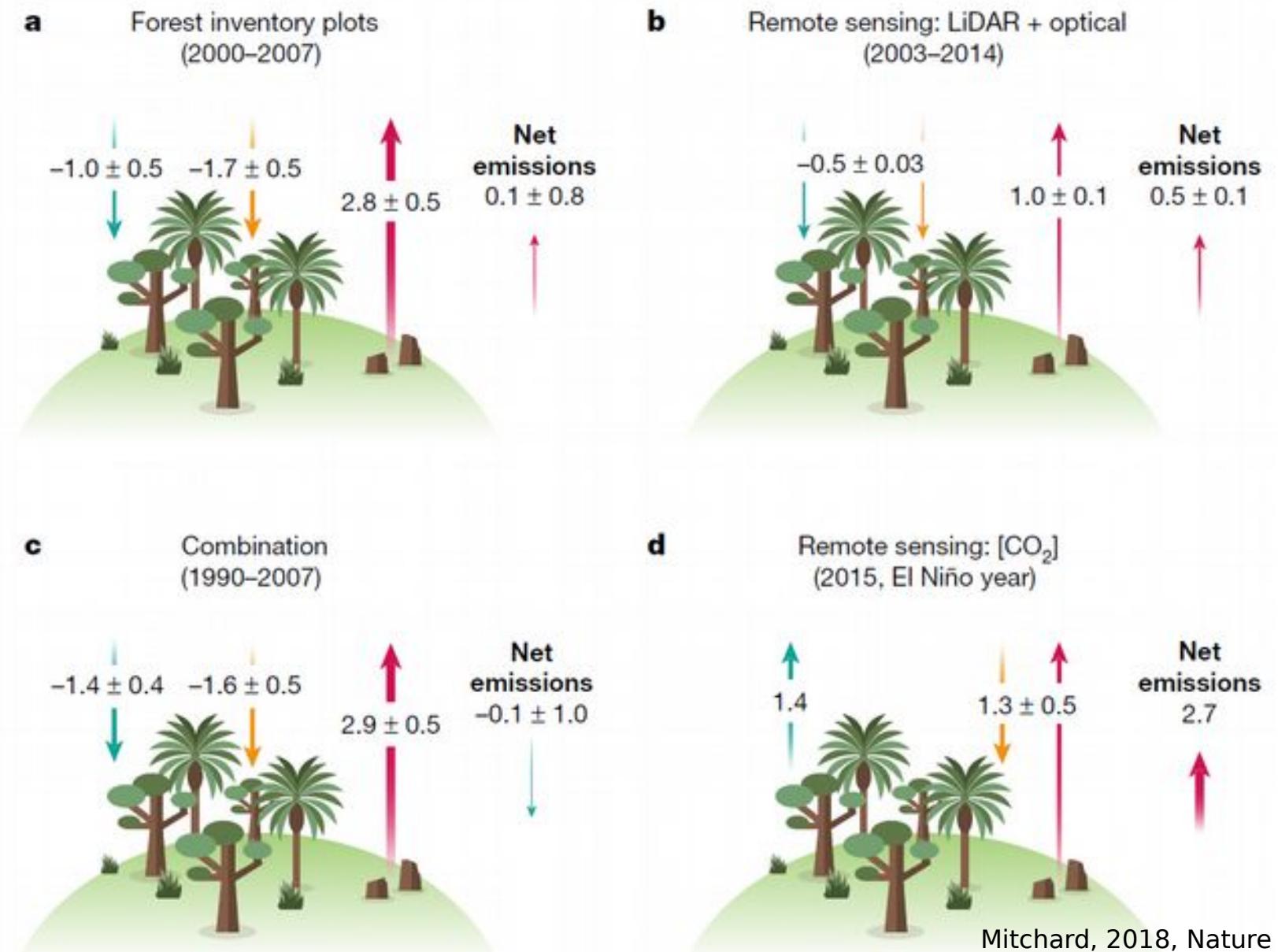


Harris, NCC, 2021

准确的森林碳汇监测对全球碳循环研究具有重要意义

背景介绍

现有森林碳储量动态监测手段还存在较大的不确定性



争议的主要原因：
现有的估算方法存在较大的限制

- 点尺度（森林调查）
- 不确定性（模型）
- 遥感手段（光学
+LiDAR+SAR）

- ✓ 非动态观测
- ✓ 受云雨天气影响
- ✓ 信号饱和

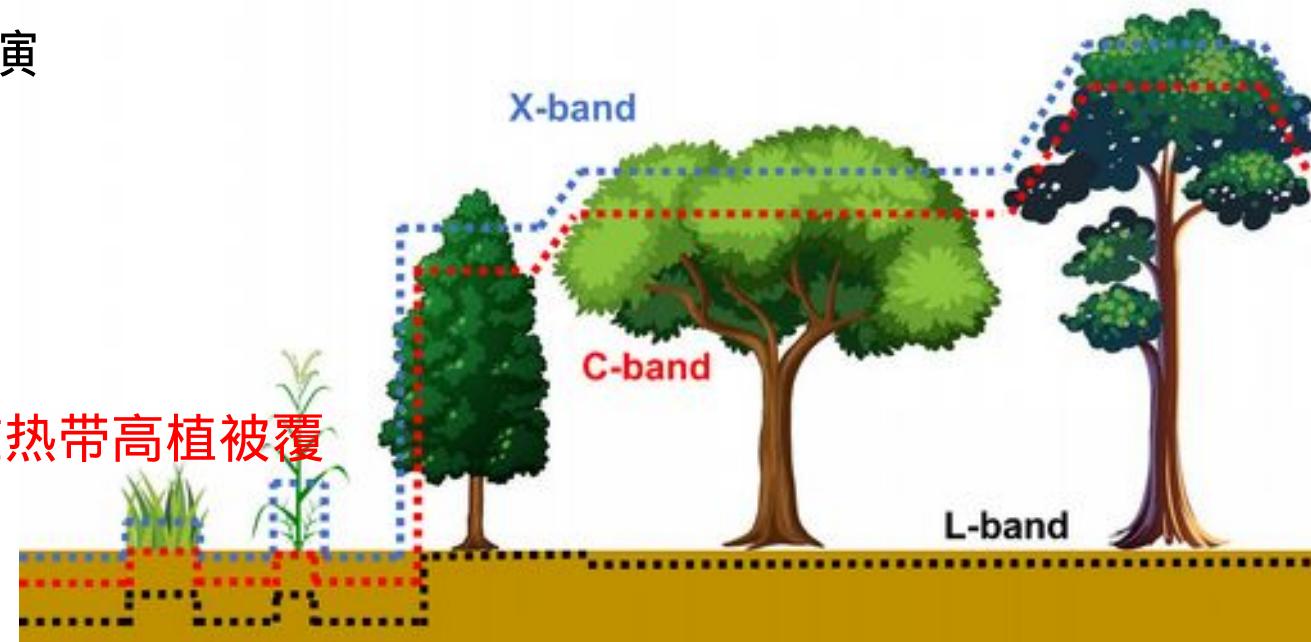
现有的遥感观测能力不足，导致无法进行热带森林碳储量的时空观测

植被含水量遥感产品（L-VOD）

- L-band vegetation optical depth (L-VOD), PI: J-P.

Wigernon

- 基于被动低频（L波段）微波卫星 **SMOS** 反演
- 时间分辨率：1~3天
- 不受云雨等天气状况的影响
- 对地上生物量没有明显的饱和现象，甚至是在热带高植被覆盖地区（低频）
- 无任何遥感产品辅助反演



Frappart et al. RS, 2020

汇报提纲

一

背景介绍

二

SMOS-IC LVOD 产品介绍

三

近期研究进展

四

讨论

SMOS-IC 土壤水分和 L-VOD 产品

- 低频 (L 波段) 被动微波遥感被认为是全球以及区域尺度监测地表 SM 的最有前途的技术 (Wigneron et al., RSE, 2017)

干旱监测



洪水预测



农作物估产



天气预报



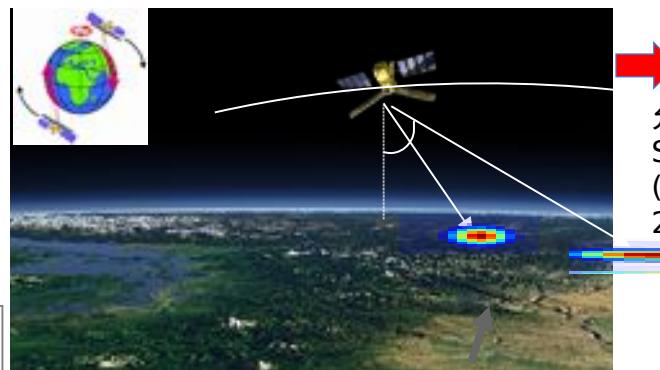
碳循环

etc...

SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), PI Y Kerr

空间分辨率：~ 35-50km
重放周期：最大为 3 天
敏感性：在陆地 ~ 2K
监测 SM 精度：~ 0.04 m³/m³

发射时间 : 2009 年 11 月 , ~ 10 年的数据



主要特点

多角度观测

允许同时反演多个地表变量，如
SM 和植被光学厚度 (L-VOD)
(Wigneron et al., 1995,
2000)

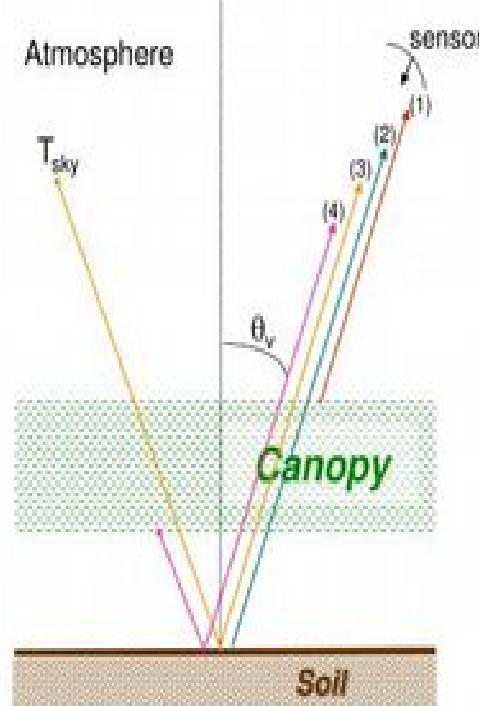
SMOS-IC 算法的发展

核心模型：L-MEB (L-band Microwave Emission of the Biosphere; Wigneron et al., RSE, 2000, 2007)



SMOS L2 和 L3 级产品均基于 L-MEB 模型进行反演

1. 微波辐射传输模型



$\tau-\omega$ Model

Radiation Components in a Vegetation Layer

- The direct vegetation emission (1)
- Soil-surface emission attenuated by the canopy (2)
- Downward cosmic background and atmospheric radiation attenuated by the canopy (3)
- The vegetation emission reflected by the soil and attenuated by the canopy(4)

2. 反演方法 / 代价函数 (CF)

$$CF = \frac{\sum(TB_{mes} - TB^*)^2}{\sigma(TB)^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{(p_i^{ini} - p_i^*)^2}{\sigma(p_i)^2}$$

其中：
 T 和 T^* 分别是观测和模拟的和TB；
 P 是需要反演的变量（即 SM 和 EVOD）；
 P^* 是反演变量的初始值；“初始值”
 σ 是反演变量的标准差。对
“约束”

SMOS-IC 算法的发展

SMOS-IC：一种精度更高的基于 SMOS 卫星的 SM 和 L-VOD 产品

特点（相比 L2 和 L3）：

- 简单（不需要能导致空间异质性的决策树，等。）
- 不需要过多的辅助数据输入（例如再分析土壤水分数据，光学植被指数（L3 中用 LAI 来作为 VOD 的初始值））：
避免了潜在的循环验证和估算 SM 以及生物量问题
→ 更方便测试和应用（Wigneron et al., 2021, RSE）
- SM 和 L-VOD 均表现优于当前 SMOS L2&L3

评估文章

R. Fernandez-Moran et al., 2017
N.Rodriguez et al., 2018, Biogeosciences
A. Al Yaari et al., 2019, RSE
Dong et al., 2020, RSE
Ma et al., 2020, RSE
A. Colliander et al. NASA JPL, 2018, 2019
etc...

应用案例：

(Brandt, et al., 2018, Nature Ecology and Evolution; Tian et al., 2018, Nature Ecology and Evolution; Quets et al., 2019, RSE; Fan et al., 2019, Nature Plants; Li et al., 2020, RSE; Tong et al., 2020, Nature Communications; Sadeghi et al., 2020, J Hydrol.; Tagesson, et al., 2020, Nature Ecology and Evolution; Wigneron J.-P. et al., 2020, Science Advances; Bastos et al., 2020, Science Advances, etc; Al-Yaari A. et al., 2020, GCB, etc....)

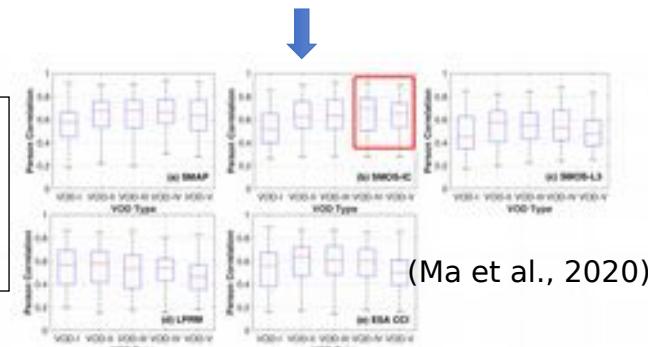


Fig. 3. Box plots of R bias (a) SMAP, (b) SMOS-IC, (c) SMOS-L3, (d) LPIM and (e) ESA-CDI soil moisture products considering various VOD types.

SMOS-IC 算法的发展

2. Inversion method/Cost Function (CF)

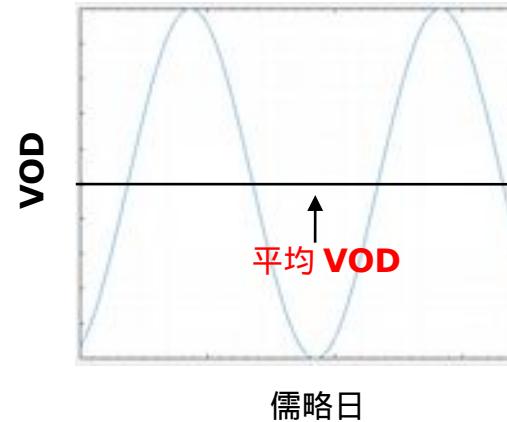
$$CF = \frac{\sum(TB_{mes} - TB^*)^2}{\sigma(TB)^2} + \sum_{i=1}^2 \frac{(P_i^{ini} - P_i^*)^2}{\sigma(P_i)^2}$$

SMOS-IC
V105

$$VOD^{ini} = \text{yearly mean VOD}$$



P_i^{ini} : “初始值”
 $\sigma(P_i)$: “约束”
↑ 对



SMOS-IC V2 (Development of the SMOS-IC V2 algorithm)

$$VOD^{ini}(t) = \begin{cases} \text{average}_{w-1}(\overbrace{VOD_{t-w_1}^*, VOD_{t-w_2}^*, \dots, VOD_{t-w}^*}^{\text{过去 } w-1 \text{ 天}}) & \text{if available} \\ VOD_m(t) & \text{if mean value of previous } w \text{ days not available} \end{cases}$$

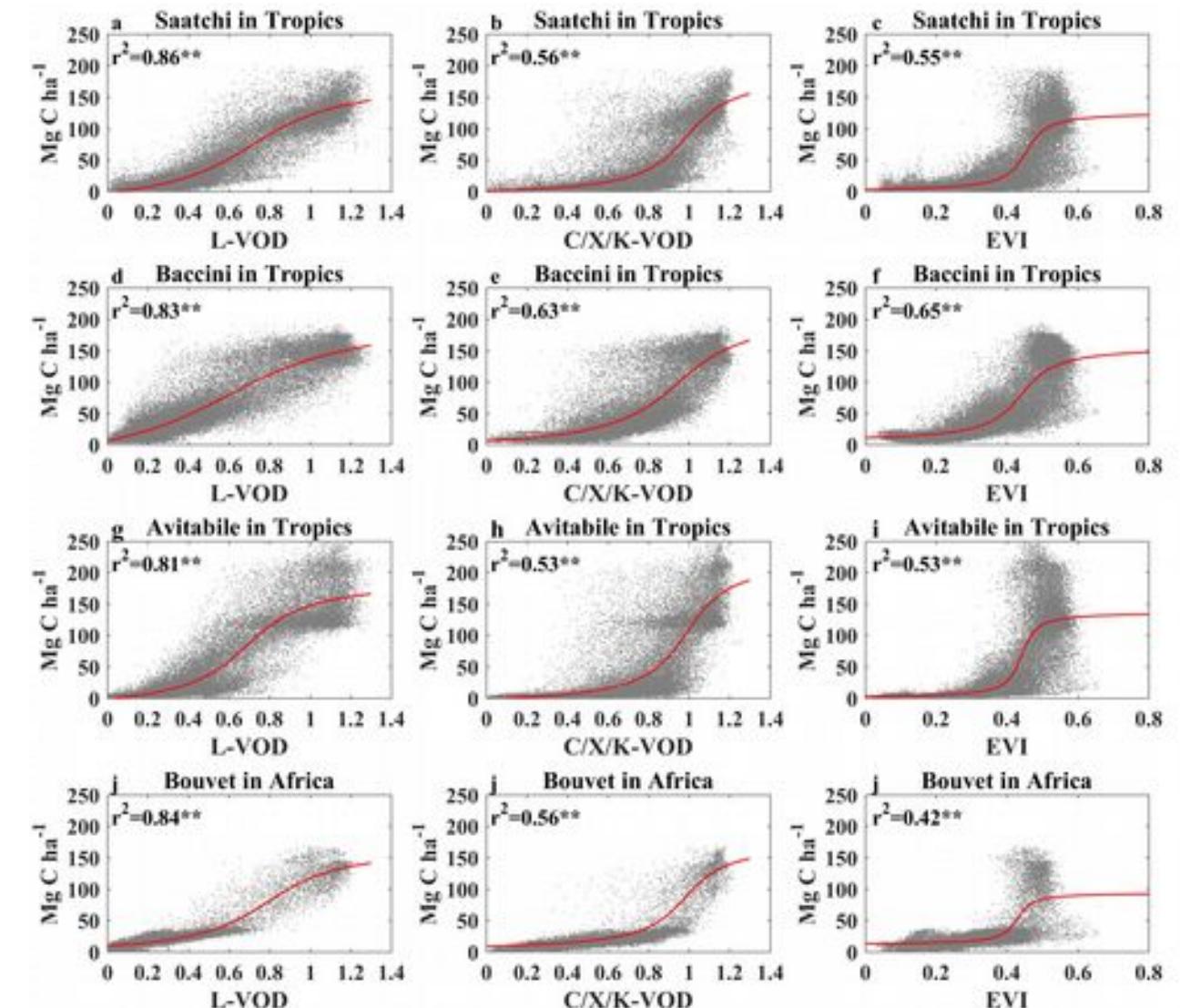
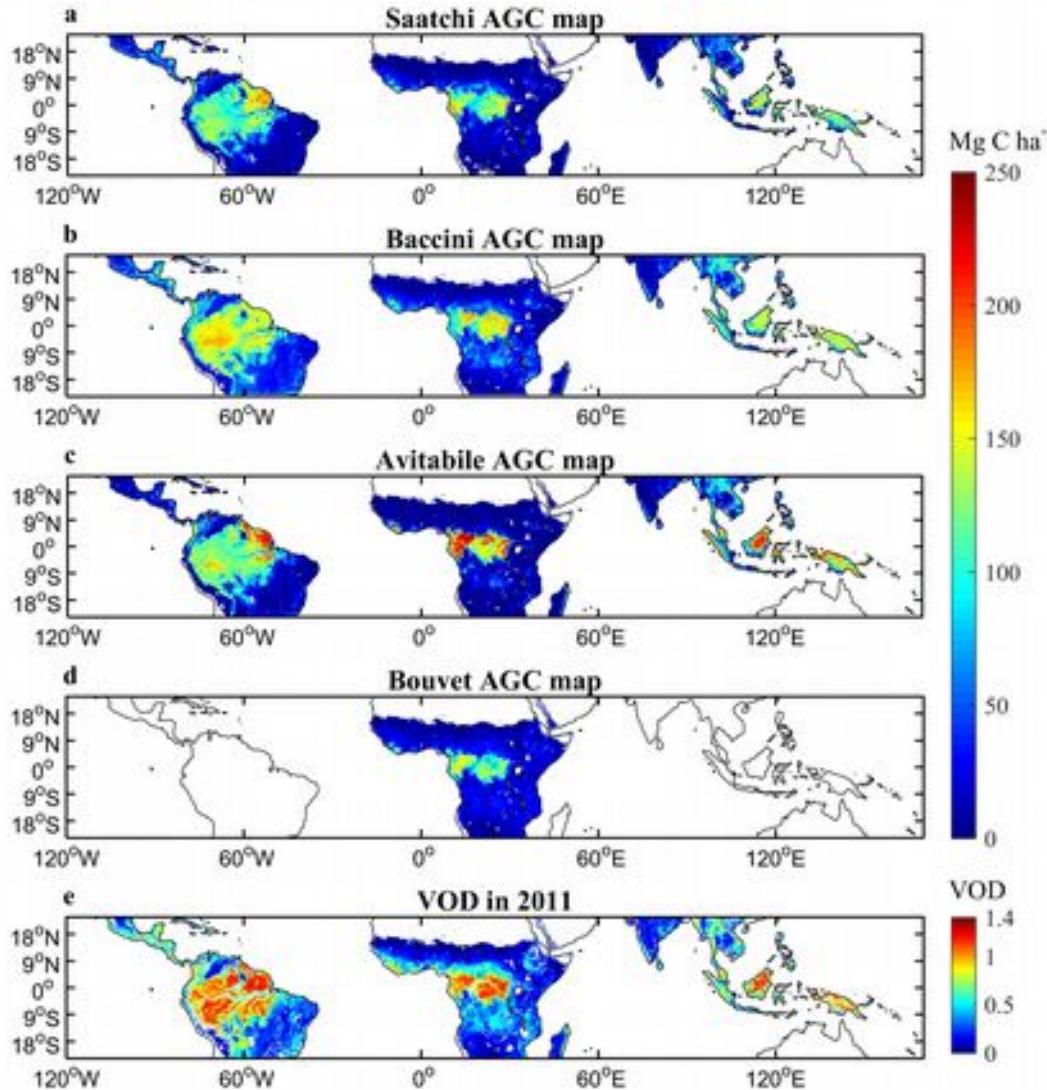
$$\sigma(VOD) = 0.005$$

- $w = 10$ 天
- $VOD_m(t)$ 是该天对应月份的多年平均值
- L-VOD 在短时间内变化较小 (Wigneron et al., RSE, 2000)

该假设与 SMOS L3 (Kerr et al., RSE, 2016) 中以及 SMAP MT-DCA (Konings et al., RSE, 2017) 的多时相 (“multi-temporal”) 输入反演概念类似

L-VOD 在估算森林碳储量的潜力

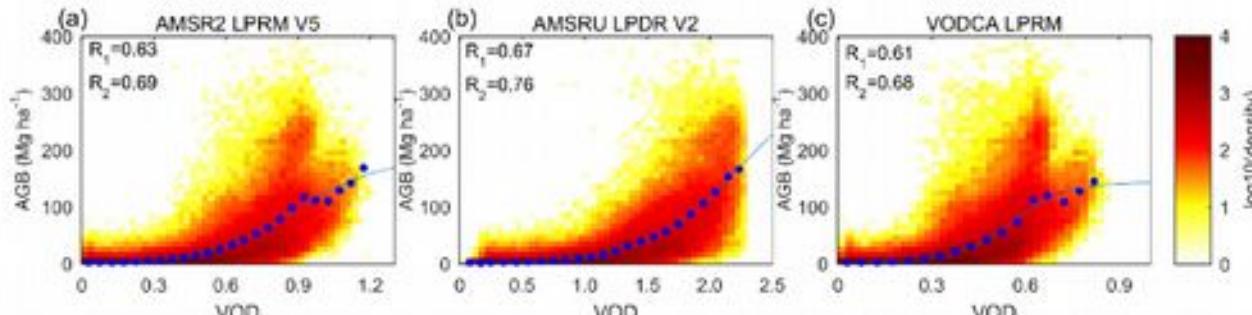
热带地区



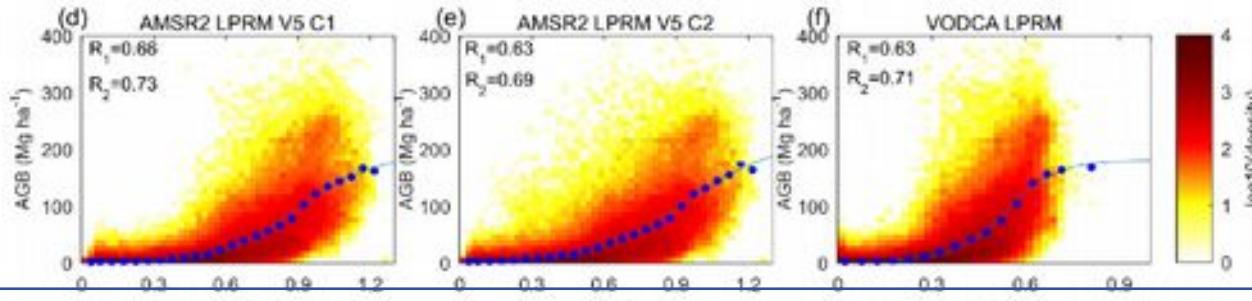
L-VOD 产品对地上生物量的敏感性

全球

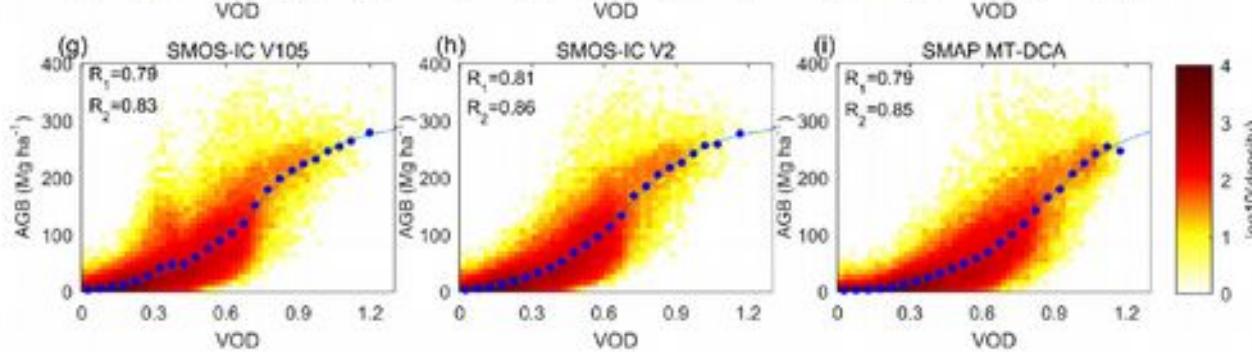
X-VOD



C-VOD

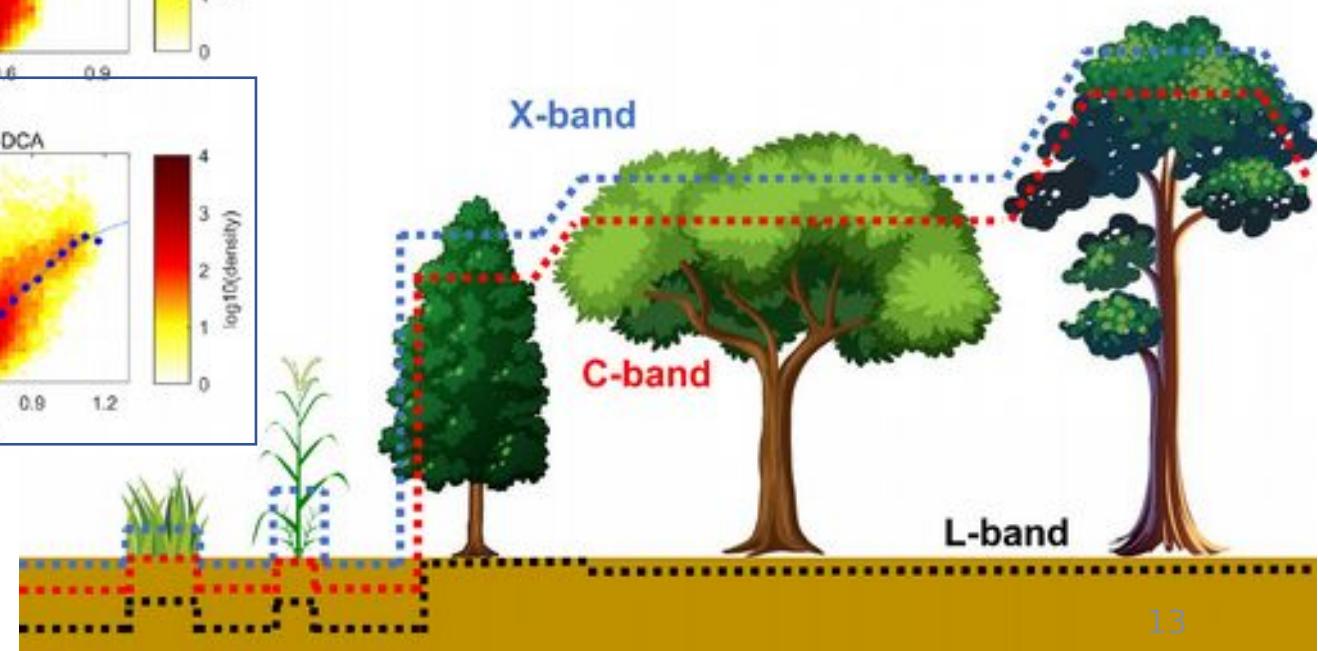


L-VOD



L-VOD 与 AGB 关系最好

Li X. JP Wigneron, et al, RSE,
2021*



汇报提纲

一

背景介绍

二

SMOS-IC LVOD 产品

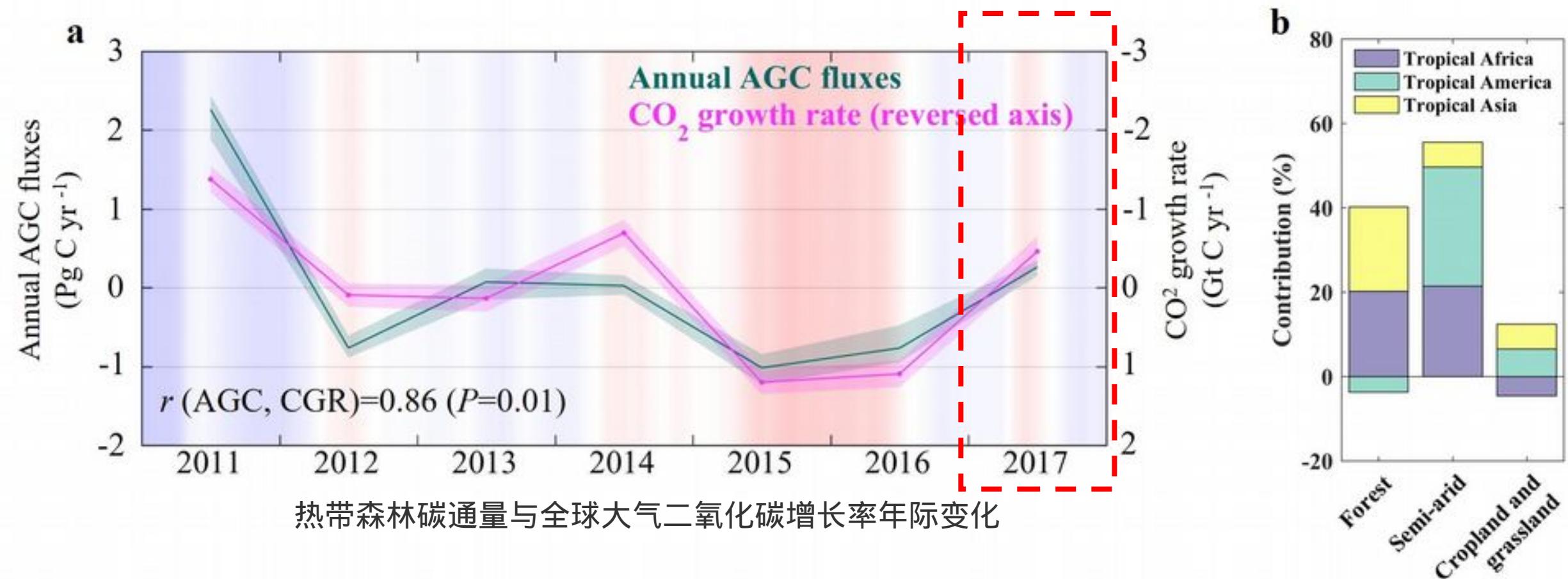
三

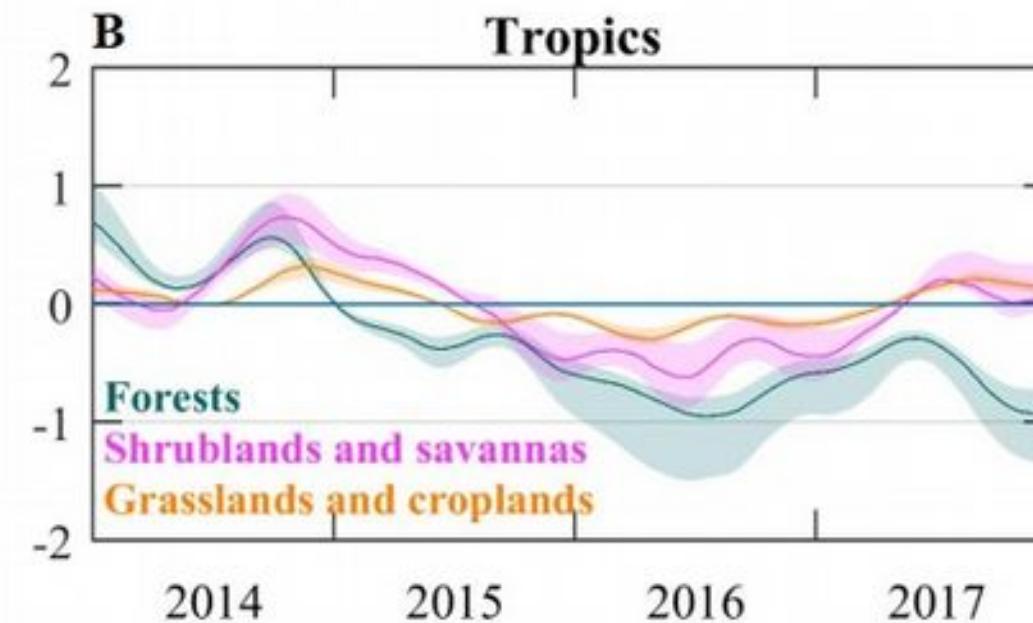
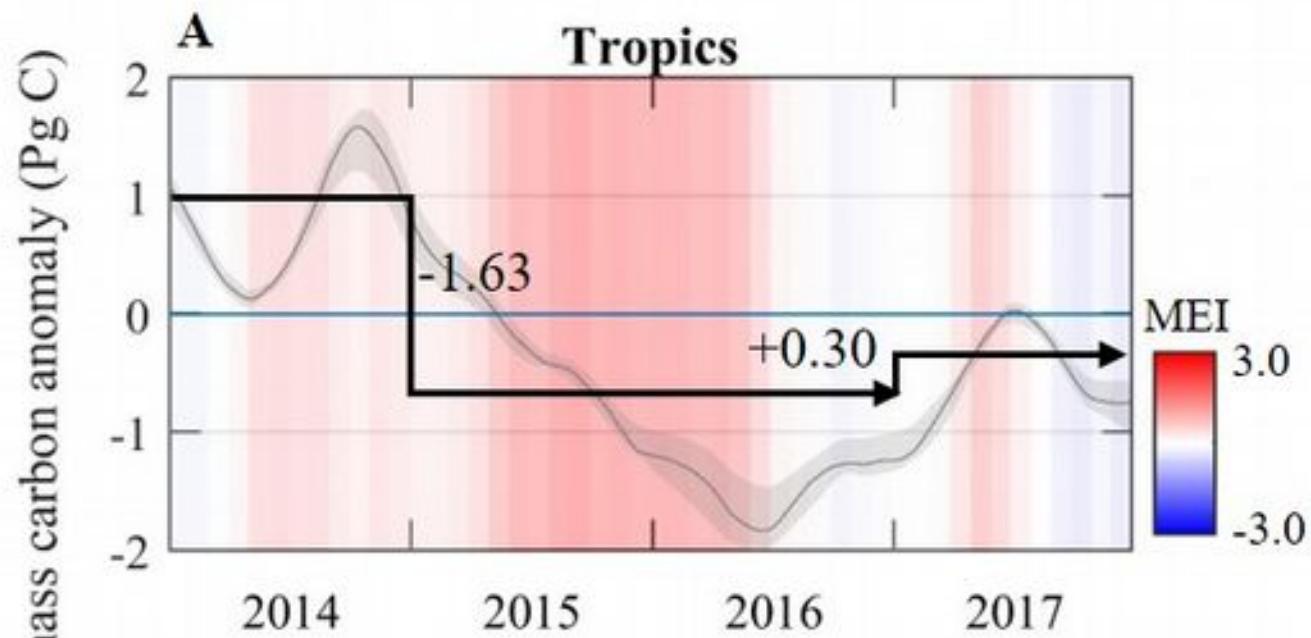
近期研究进展

四

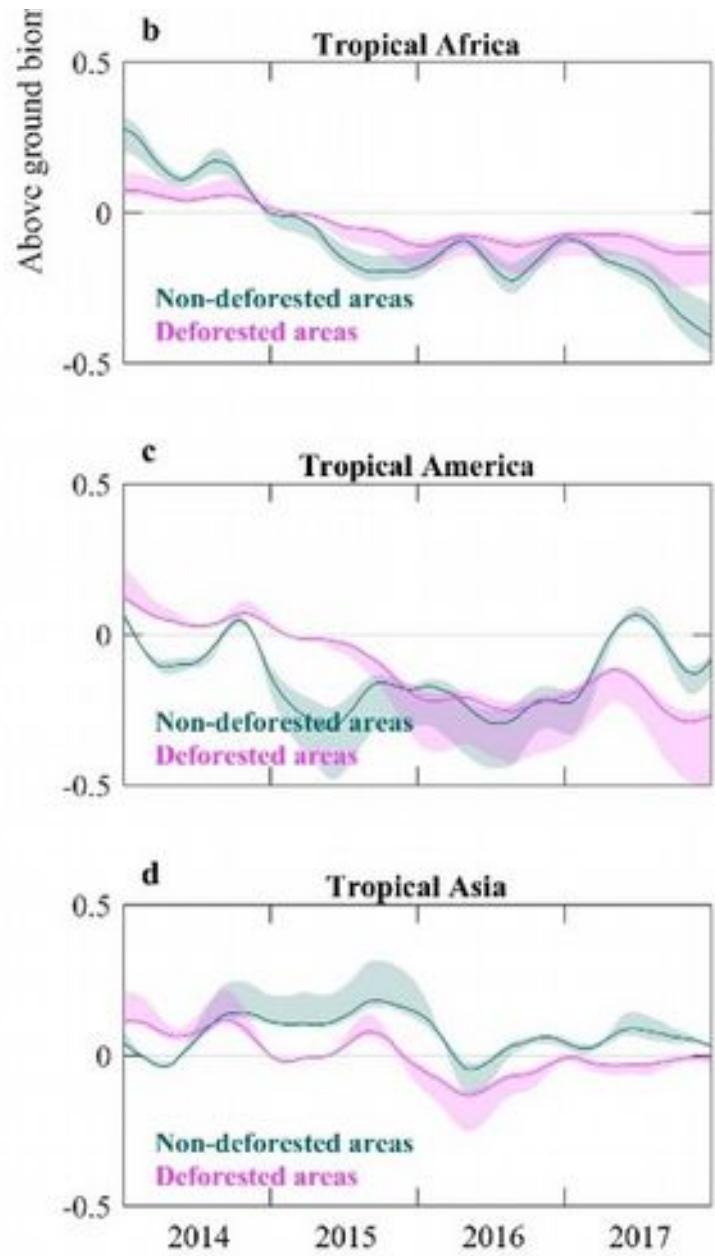
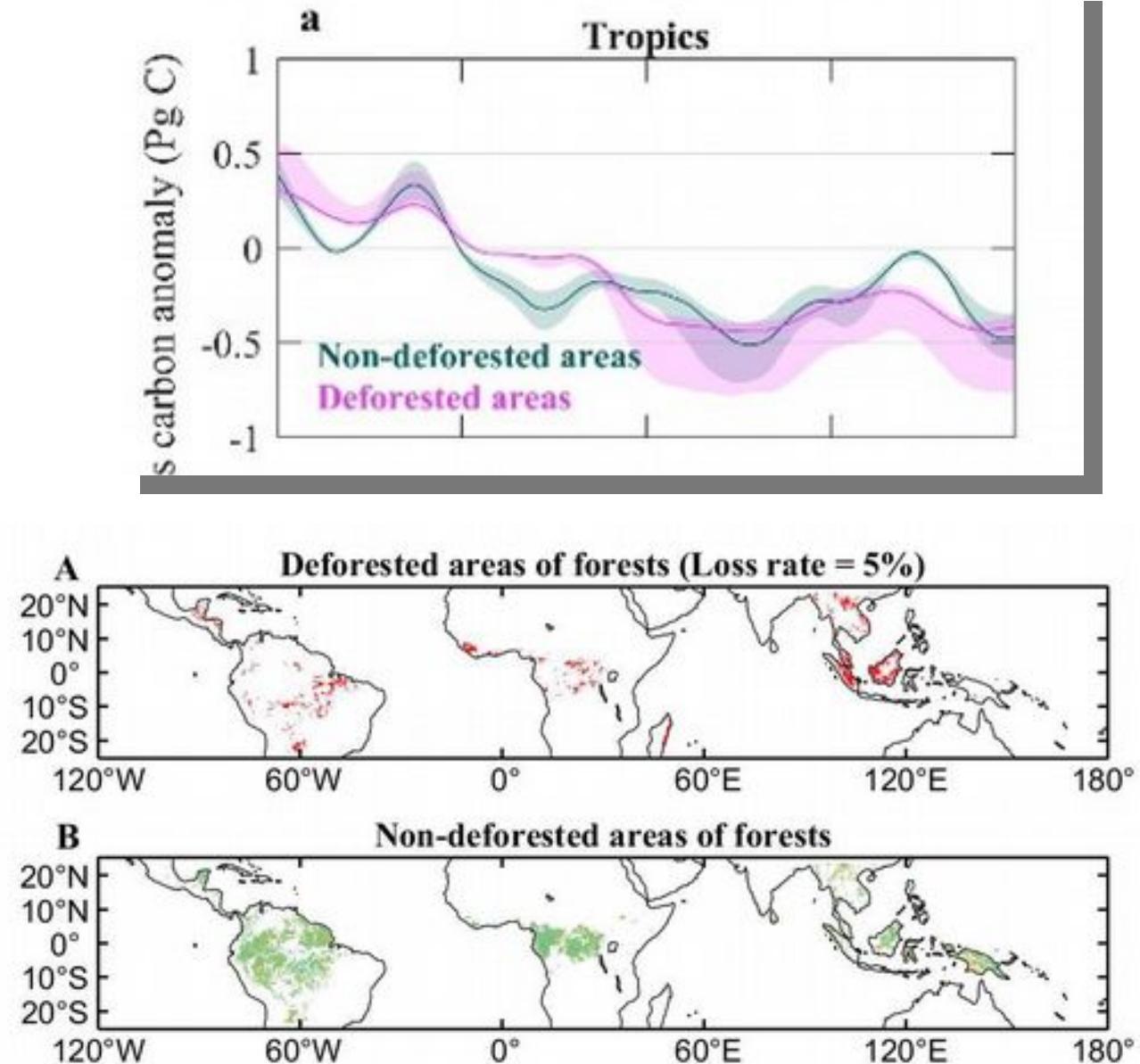
讨论

- Carbon losses of biomass ($-1.6 [-1.82, -1.14]$ PgC) during the severe 2015–2016 El Niño accounted for 90% of the anomaly in atmospheric CGR (1.7 PgC).

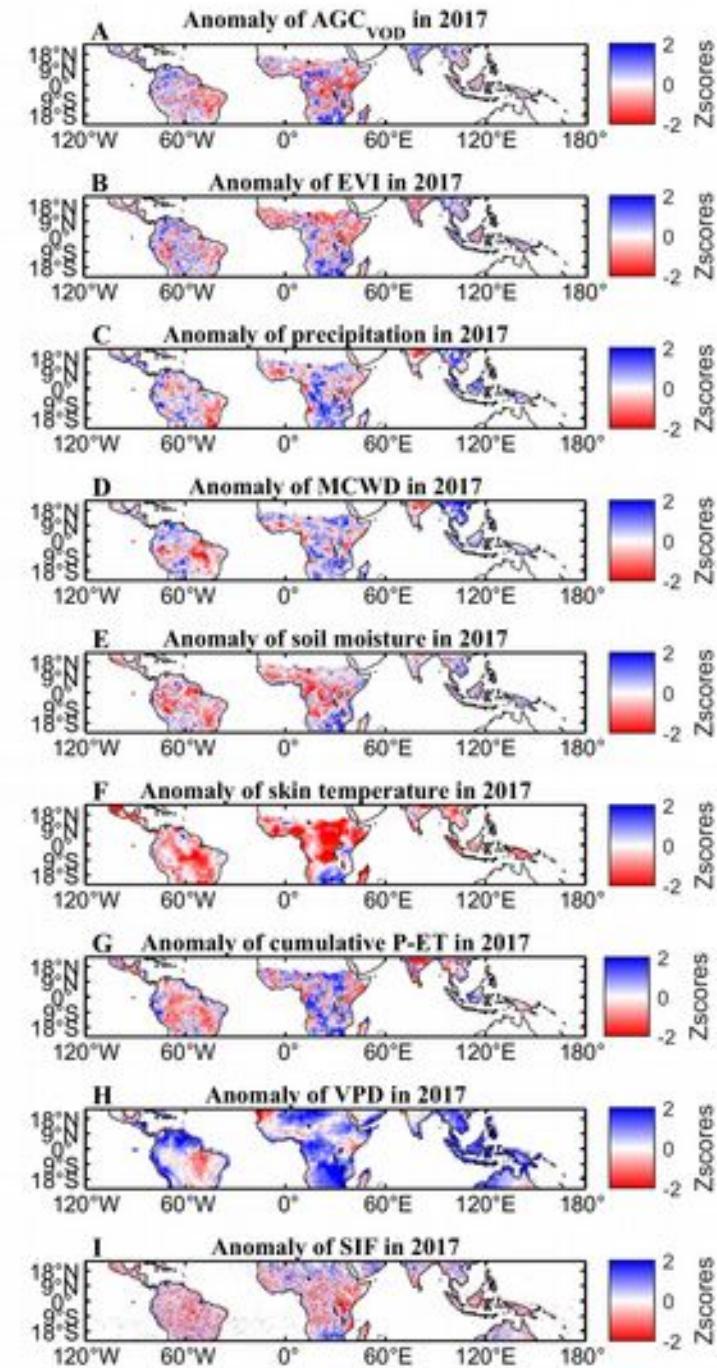
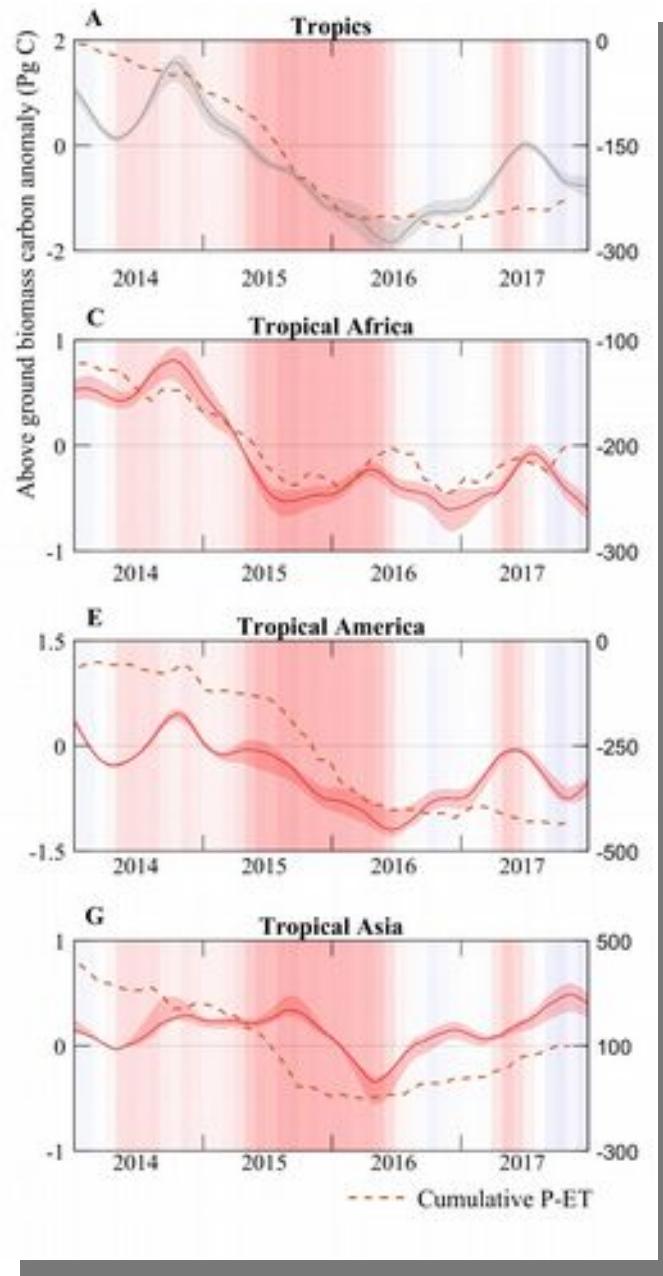




■ 森林退化抑制了森林碳储量恢复能力

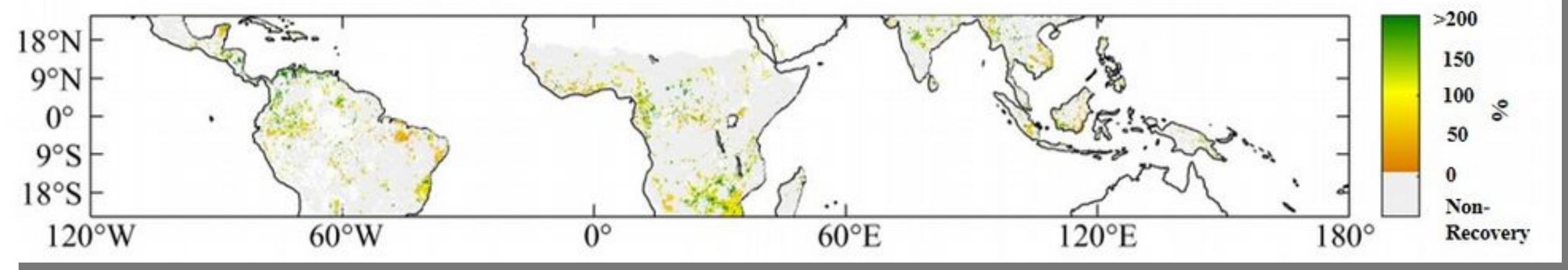


■ 持续的干旱严重限制了热带地区的恢复能力

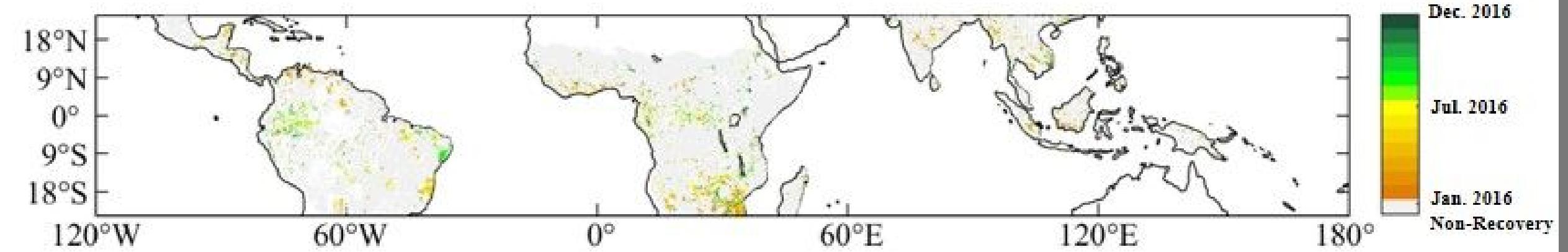


■ 热带地区的恢复能力

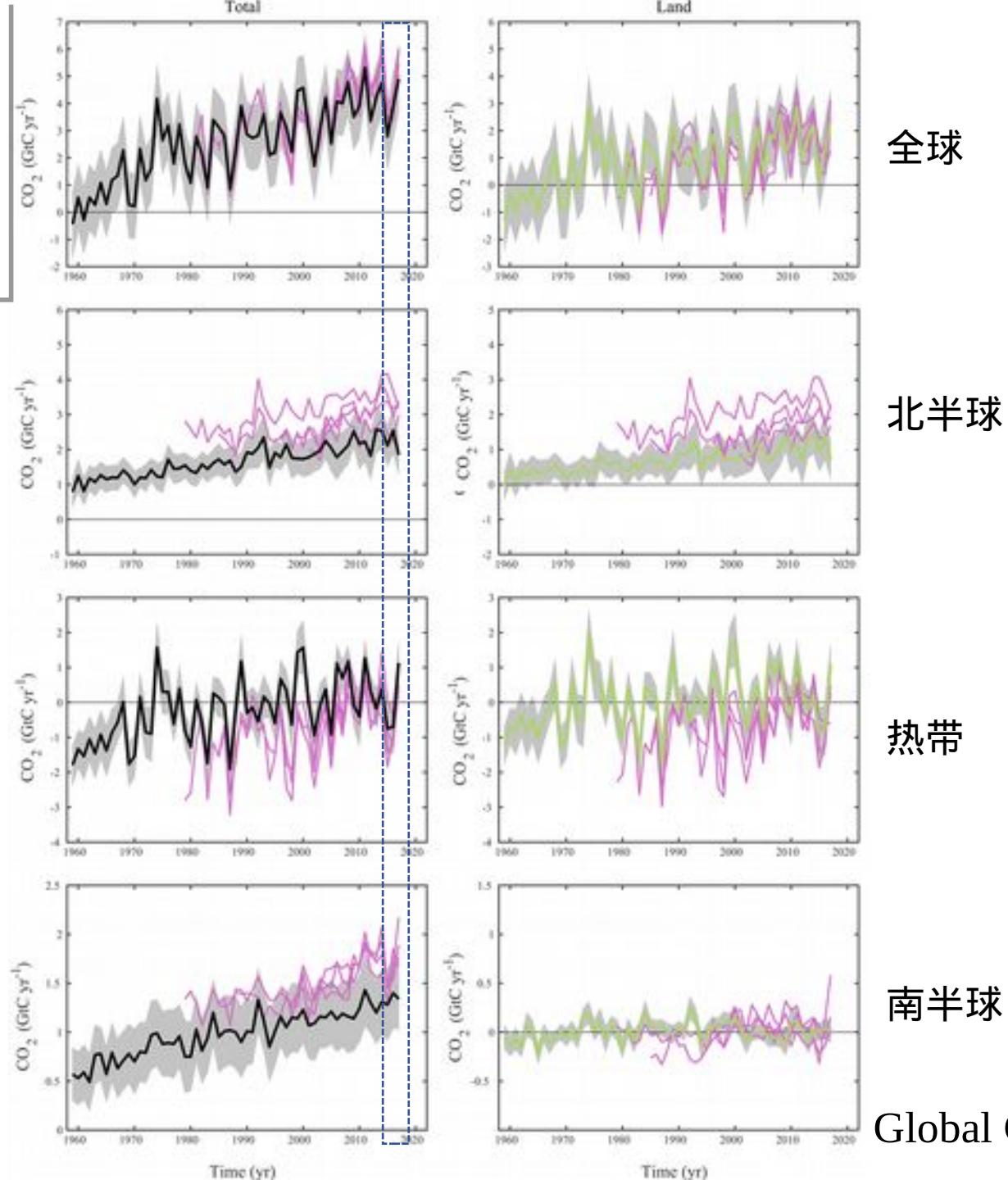
■ Recovery ‘strength’ 碳恢复强度



■ Recovery ‘date’ 碳恢复时间



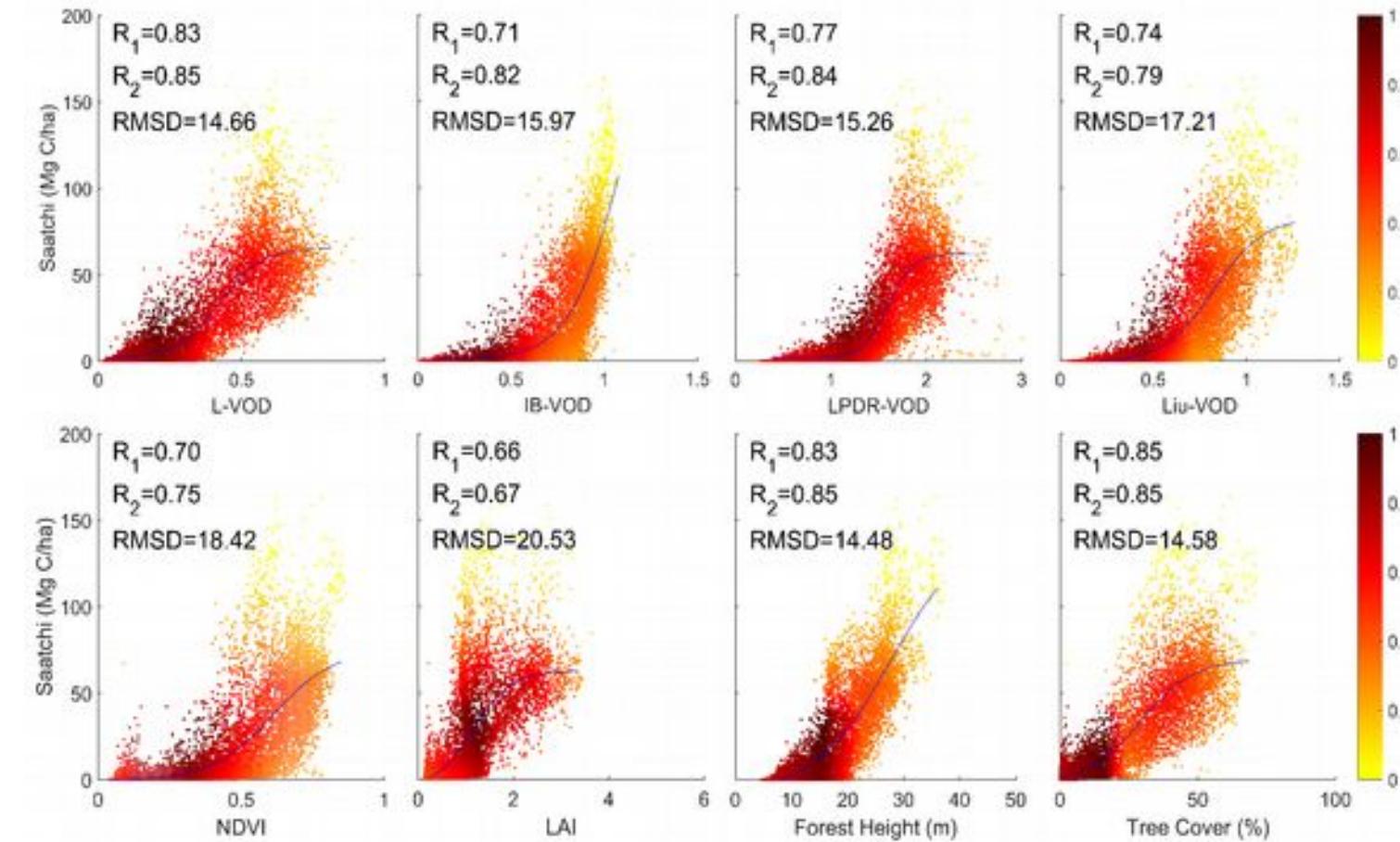
- 部分路面过程模型认为热带森林已经充分恢复到 15/16 年之前的水平



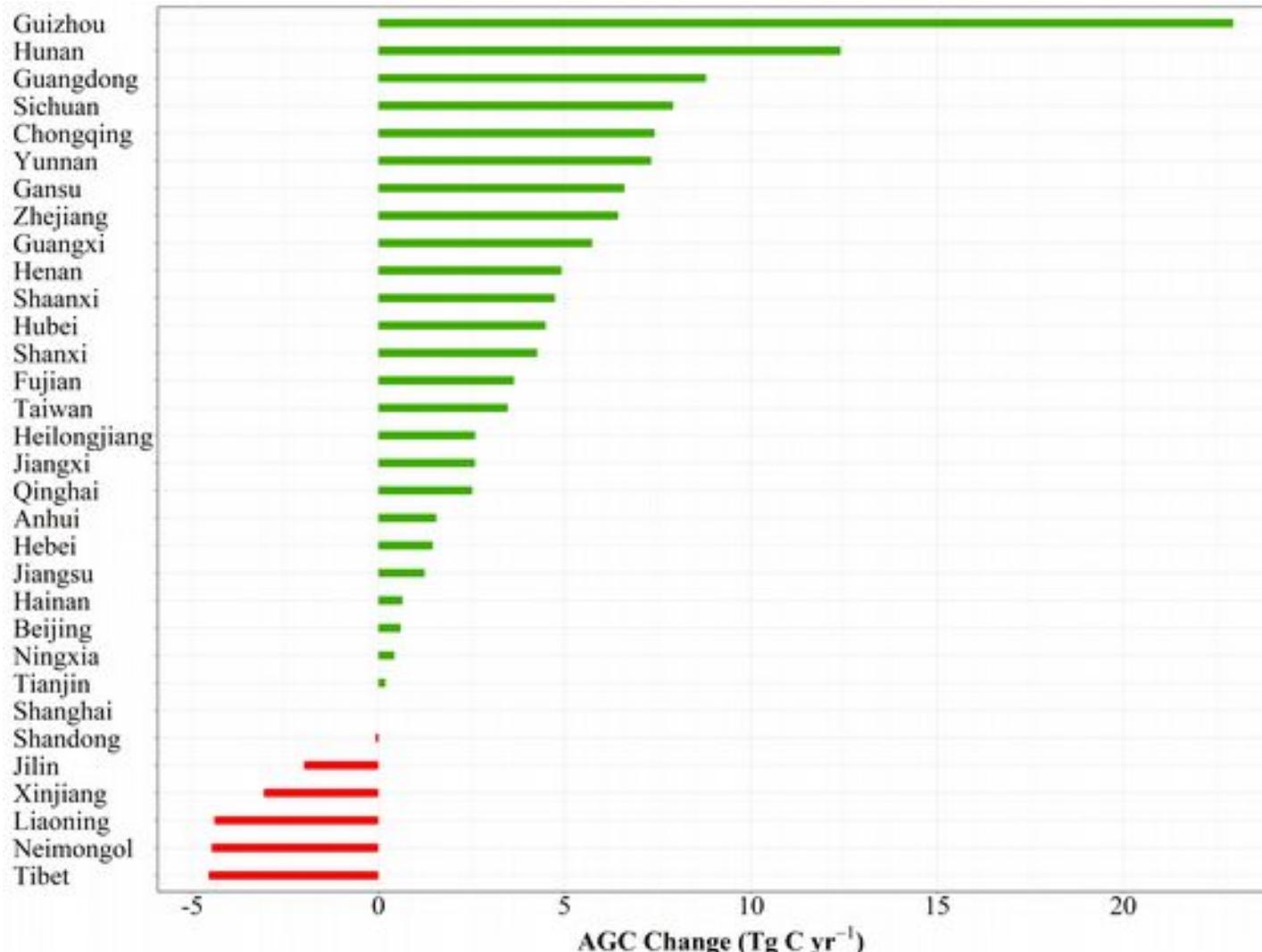
Global Carbon Budget, 2018

研究进展 3

VOD 和 VI 产品对地上生物量 (AGC) 的敏感性



- Calibration between VOD/VI and the six reference AGC maps
- Retrieved AGC in other years during 2013-2019
- AGC estimates in China during 2013-2019

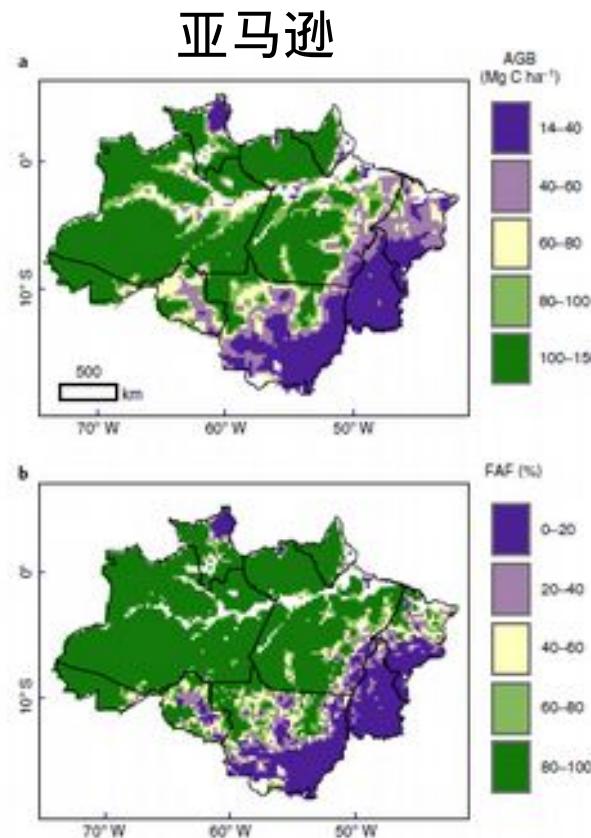


植被碳储量增加主要来源于中国南方 ($+0.1 \text{ PgC yr}^{-1}$)

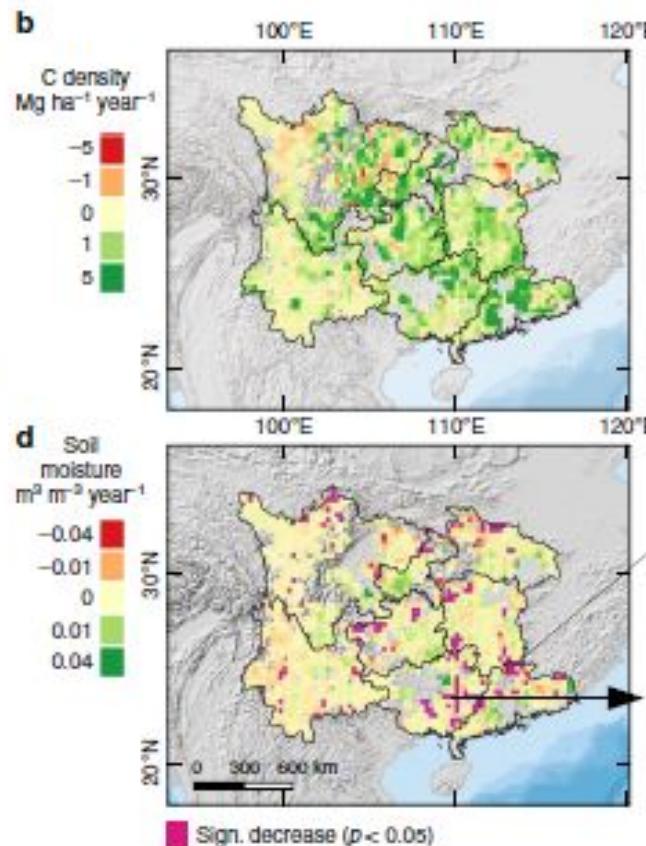
Chang ZB, Fan L* et al., Prepared 22

研究进展 4

全球森林碳储量时空变化研究

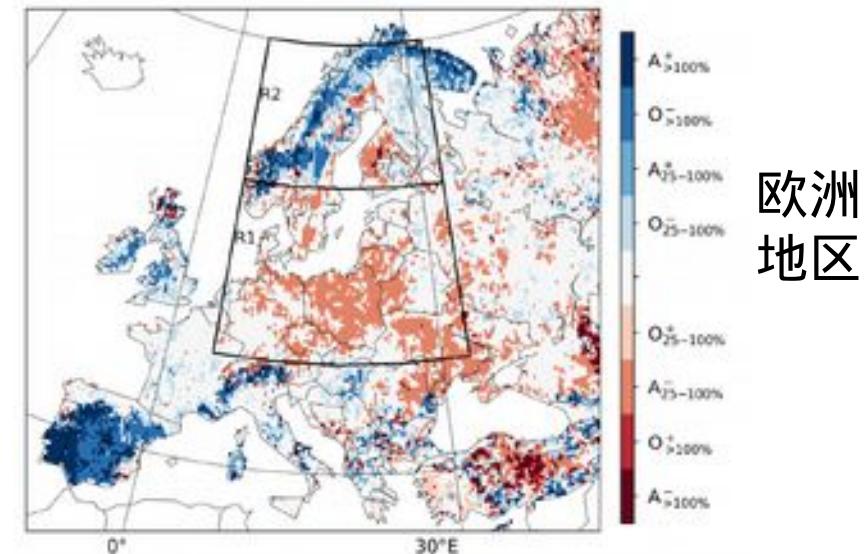


Qin YW, et al., NCC, 2021

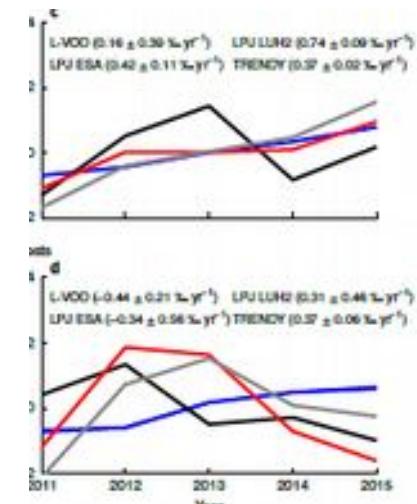


Tong XW, et al., NCOM, 2021

中国南方
喀斯特地区



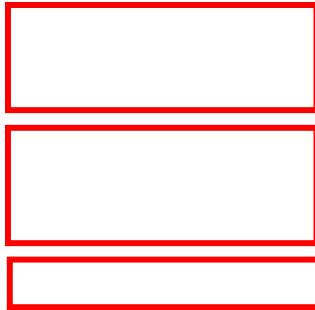
Bastos A, et al., SA, 2020



北半球
高纬度地区

Tagesson, et al., NEE, 2020

研究进展 5 IB X-VOD 产品



(a) Spatial R ² with Bouvet AGB					
H _R	0.2	0.4	0.6	0.8	1
ω	0.617	0.614	0.611	0.609	0.608
0.05	0.678	0.678	0.677	0.675	0.673
0.06	0.582	0.598	0.611	0.623	0.635
0.07	0.848	0.855	0.86	0.863	0.863

(e) Spatial R ² with NDVI					
H _R	0.2	0.4	0.6	0.8	1
ω	0.861	0.865	0.866	0.866	0.864
0.05	0.862	0.867	0.871	0.87	0.869
0.06	0.848	0.855	0.86	0.863	0.863
0.07	0.848	0.855	0.86	0.863	0.863

(f) Temporal R with LAI					
H _R	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
ω	0.668	0.671	0.675	0.679	0.683
0.05	0.654	0.658	0.663	0.667	0.672
0.06	0.634	0.641	0.648	0.654	0.661
0.07	0.634	0.641	0.648	0.654	0.661

$$\omega = 0.06, H_R = 0.6$$



(a) Spatial R ² with Bouvet AGB					
Slope	-20	-40	-80	-160	-320
σ(VOD)	0.801	0.810	0.736	0.609	0.742
0.025	0.799	0.811	0.754	0.622	0.738
0.05	0.805	0.814	0.793	0.661	0.671
0.1	0.792	0.808	0.816	0.798	0.683
0.2	0.765	0.788	0.802	0.800	0.742
0.3	0.742	0.766	0.782	0.786	0.763
0.4	0.674	0.687	0.700	0.770	0.761
0.5	0.674	0.687	0.700	0.770	0.761

(e) Spatial R ² with NDVI					
Slope	-20	-40	-80	-160	-320
σ(VOD)	0.806	0.866	0.837	0.815	0.693
0.025	0.817	0.884	0.843	0.797	0.662
0.05	0.867	0.899	0.868	0.794	0.699
0.1	0.889	0.896	0.885	0.855	0.809
0.2	0.888	0.890	0.885	0.873	0.853
0.3	0.884	0.886	0.883	0.876	0.867
0.4	0.862	0.866	0.867	0.877	0.871
0.5	0.862	0.866	0.867	0.877	0.871

(f) Temporal R with LAI					
Slope	-20	-40	-80	-160	-320
σ(VOD)	0.510	0.524	0.544	0.478	0.344
0.025	0.507	0.537	0.556	0.515	0.400
0.05	0.523	0.601	0.608	0.555	0.477
0.1	0.588	0.654	0.690	0.689	0.671
0.2	0.616	0.663	0.691	0.702	0.698
0.3	0.626	0.660	0.683	0.694	0.695
0.4	0.625	0.634	0.642	0.685	0.687
0.5	0.625	0.634	0.642	0.685	0.687

$$\text{slope} = -40 \text{ and } \sigma(\text{VOD}) = 0.1$$

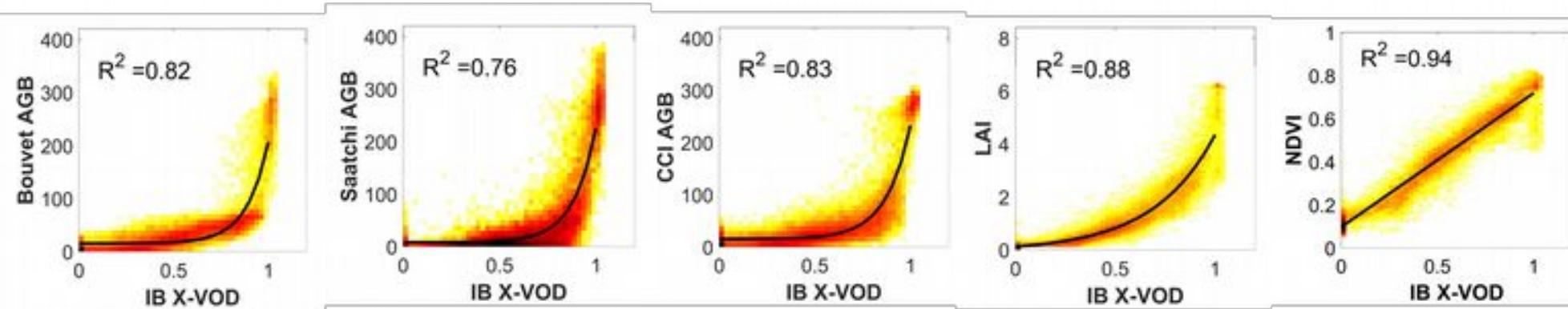


ω	(a) Spatial R ² with				(b) Temporal R with		
	Bouvet AGB	Saatchi AGB	CCI AGB	LAI	NDVI	LAI	NDVI
0.05	0.801	0.738	0.810	0.878	0.900	0.602	0.650
0.06	0.814	0.757	0.825	0.885	0.899	0.601	0.646
0.07	0.818	0.754	0.823	0.881	0.894	0.568	0.629

$$\omega = 0.06, H_R = 0.6, \text{slope} = -40 \text{ and } \sigma(\text{VOD}) = 0.1$$

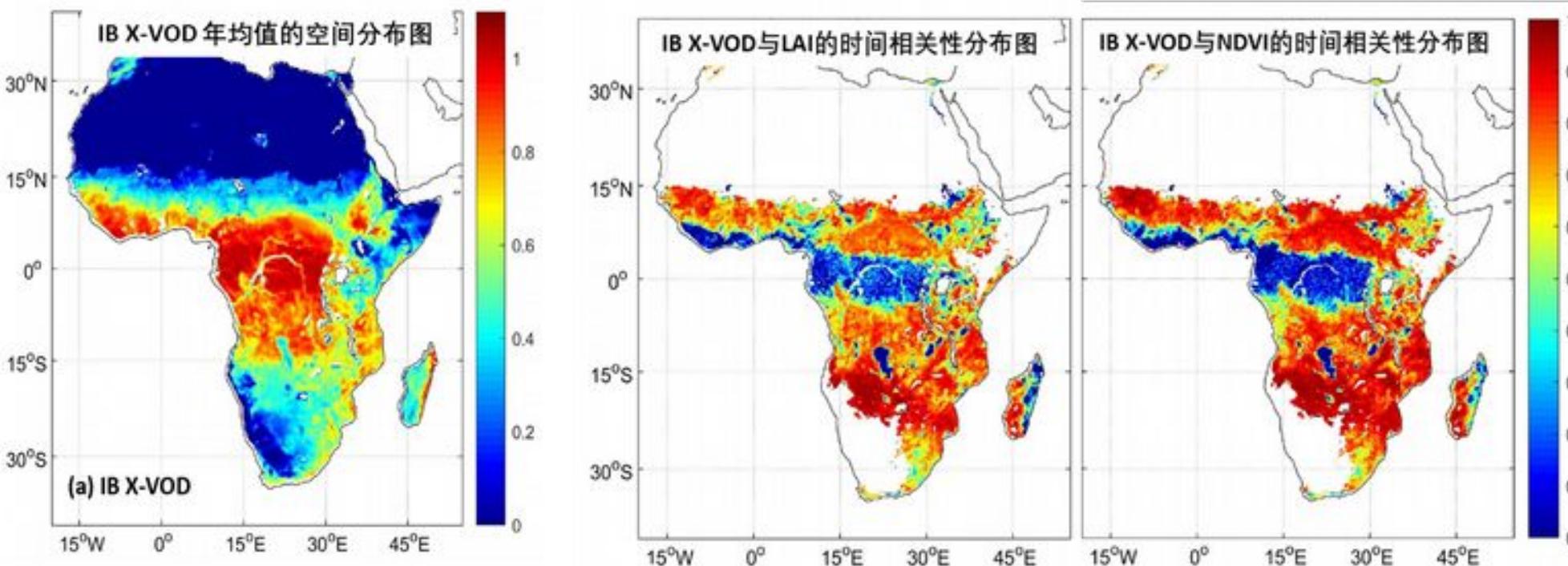
Wang M., Fan L. JP Wigneron*, et al., RSE, 2021

研究进展 5 IB X-VOD 产品



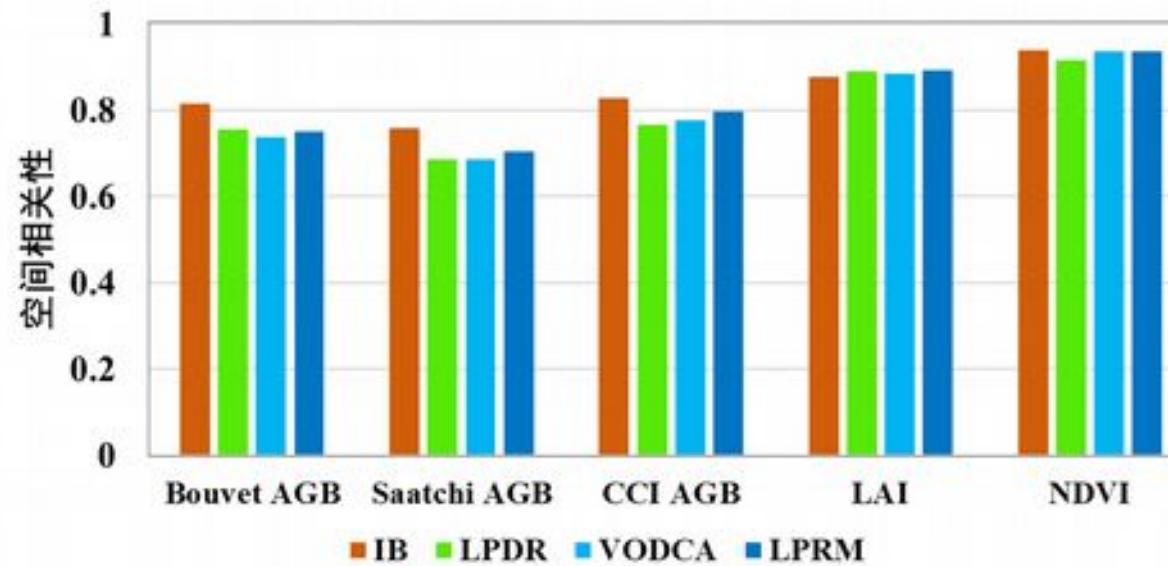
结合 AGB, LAI 和 NDVI 验证
X-VOD :

➤ 空间相关性
IB X-VOD 与 AGB/LAI/NDVI 的关系紧密， R^2 为 0.76-0.94。



➤ 时间相关性
大部分区域 IB X-VOD 与 LAI 和 NDVI 的时间相关性很高，浓密森林由于季节变化不明显，且多云雨天气，关系较弱。

IB/LPDR/LPRM/VODCA X-VOD 比较



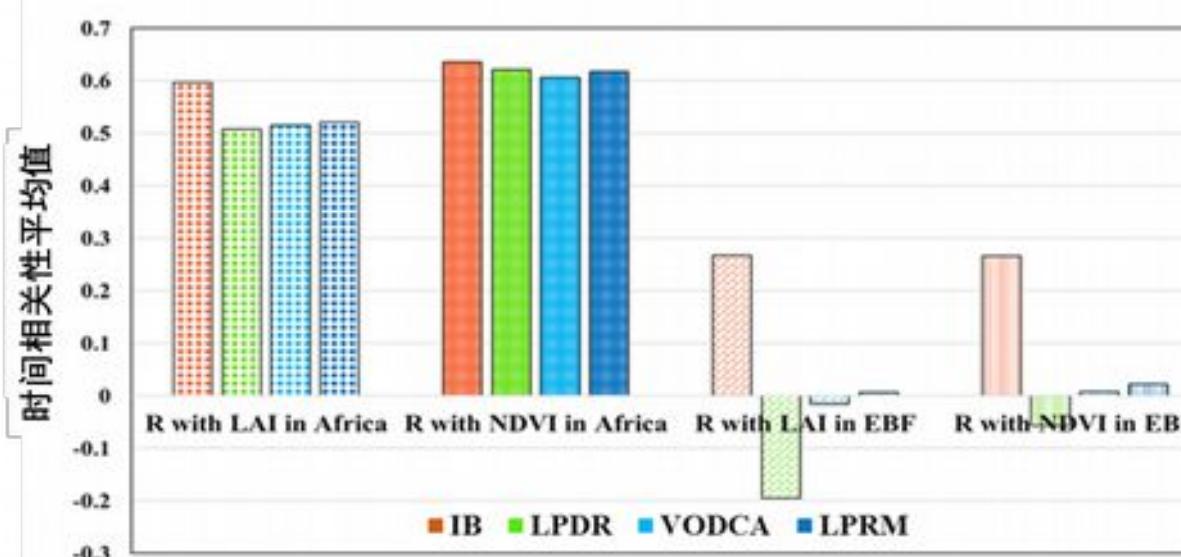
与其他产品比较：

➤ 空间相关性

相对于其他产品，IB X-VOD 与 AGB/NDVI 的关系更紧密，与 LAI 的相关性非常接近最优模型。

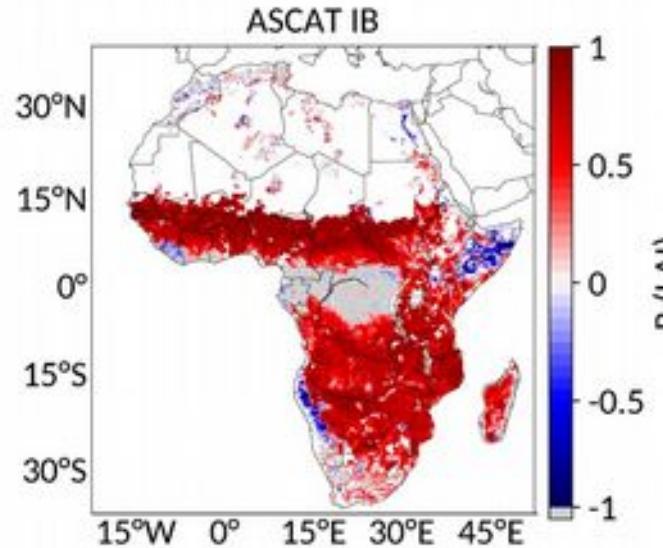
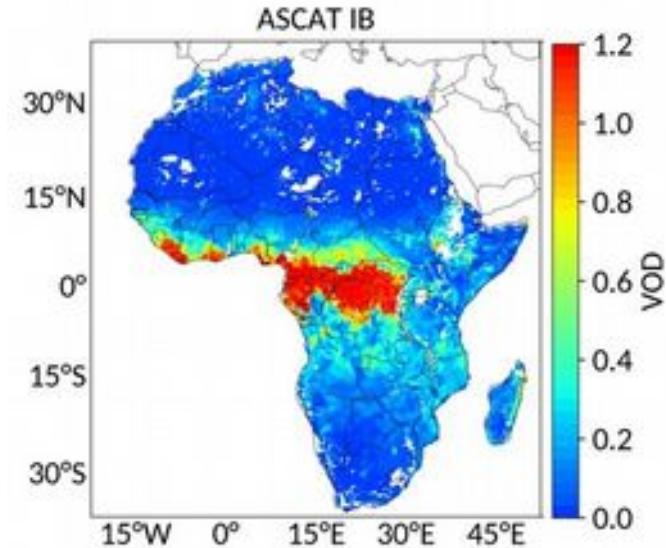
➤ 时间相关性

IB X-VOD 与 LAI 和 NDVI 的时间相关性更高，在浓密森林 IB X-VOD 的优势更加明显。

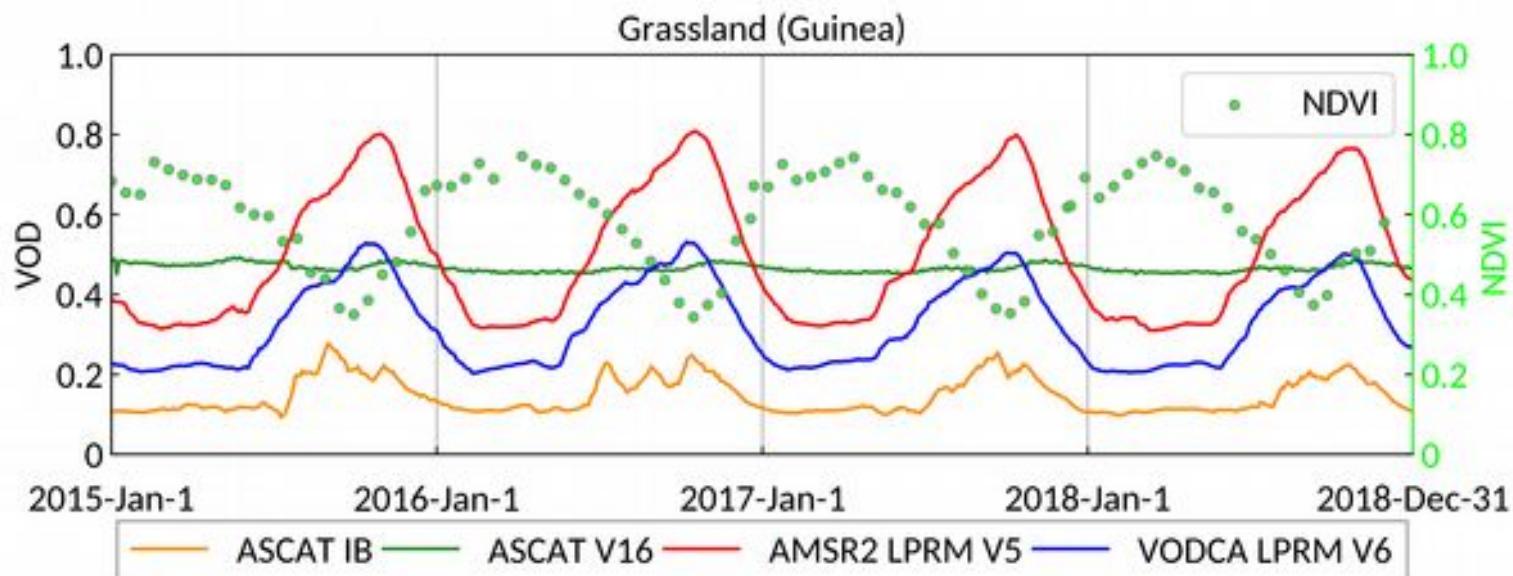
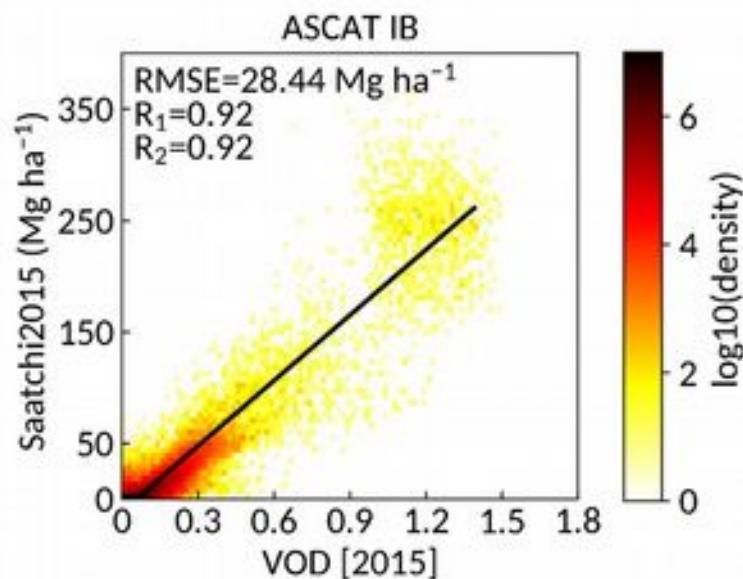


研究进展 6

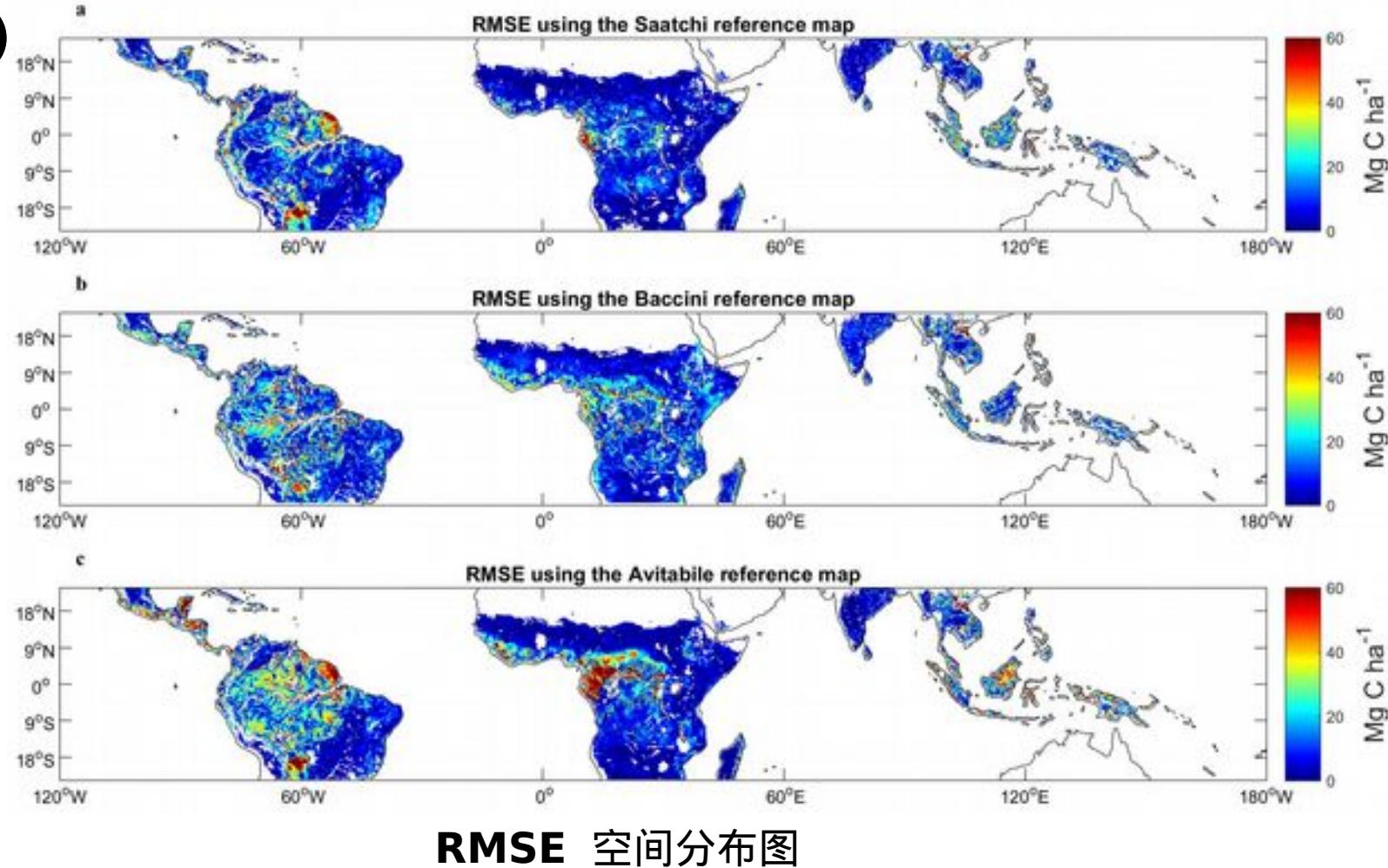
ASCAT IB C-VOD



- 空间相关性
ASCAT IB VOD 和生物量具有很好的相关关系
- 时间相关性
ASCAT IB VOD 能够捕捉生物的生长状况



RFI、水体、粗分辨率 (25km)



SMOS-IC 产品
<https://ib.remote-sensing.inrae.fr/>



参考文献

1. Wigneron, J.; Fan, L.; Ciais, P.; Chave, J.; Brandt, M.; Baccini, A.; Saatchi, S and Fensholt, R. Tropical forests did not recover from the strong 2015-2016 El Niño event, *Science Advances*, 2020, 6: eaay4603.
2. Fan, L.; Wigneron, J.; Ciais, P.; Chave, J.; Brandt, M.; Fensholt, R.; Saatchi, S., Xiao, X.; Myneni, RB. and Penuelas, J., et al. Satellite observed pantropical carbon dynamics. *Nature Plants*, 2019, 5 (9), 944-951
3. Fan, L.; Wigneron, J.; Alyarri, A., et al. Evaluation of microwave remote sensing for monitoring live fuel moisture content in the Mediterranean region. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205, 210-233.
4. Wang M, Fan, L., Wigneron, J., et al. An alternative AMSR2 vegetation optical depth for monitoring vegetation at large scales. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 263, 112556.
5. JP Wigneron; X Li; F Frappart; L Fan,. et al. SMOS-IC data record of soil moisture and L-VOD: Historical development, applications and perspectives, *Remote Sensing of Environment*, 254, 112238.
6. X Li.; JP Wigneron; F Frappart; L Fan,. et al. Global-scale assessment and inter-comparison of recently developed/reprocessed microwave satellite vegetation optical depth products, *Remote Sensing of Environment*, 2021, 253, 112208.
7. Y Qin, X Xiao, JP Wigneron, P Ciais, M Brandt, L Fan, et al. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, 2021, 11 (5), 442-448.