

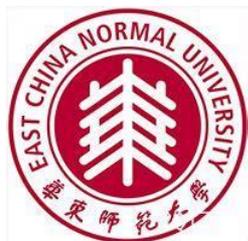
## 基于植物功能性状理解生态系统功能 模拟和预测的不确定性

Understanding the simulation and prediction uncertainty in  
terrestrial ecosystem function based on plant functional traits

崔二乾

边晨昱, 魏宁, 黄昆, 夏建阳

华东师范大学 - 生态与环境科学学院



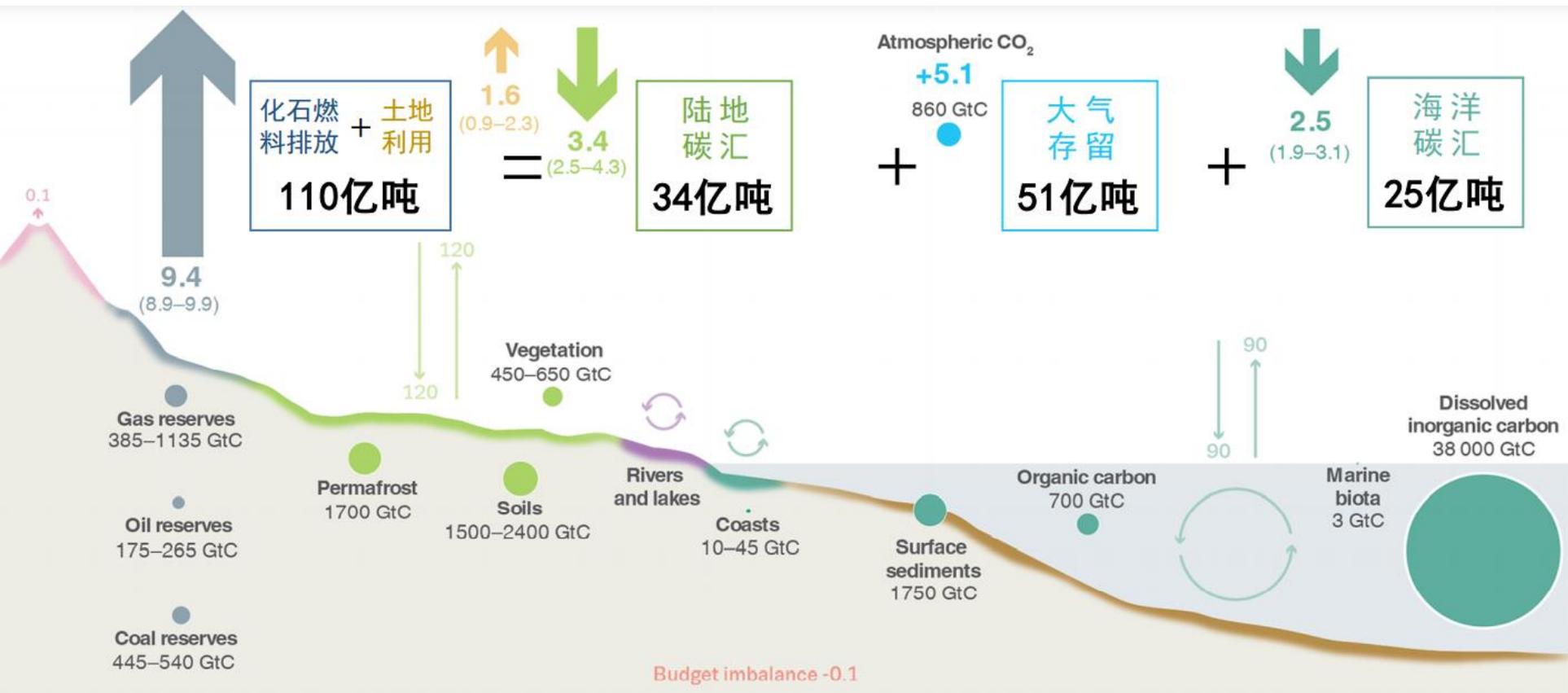
# 汇报提纲

---

- 一、陆地生态系统碳汇功能及其预测的不确定性
- 二、植物功能性状对生态系统功能模拟差异的贡献
- 三、基于植物功能性状预测生态系统功能的气候响应
- 四、基于通量观测连接个体性状与生态系统功能

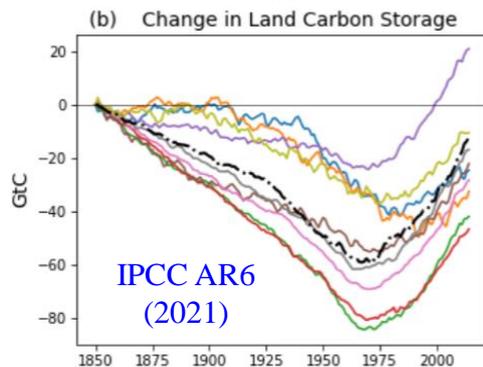
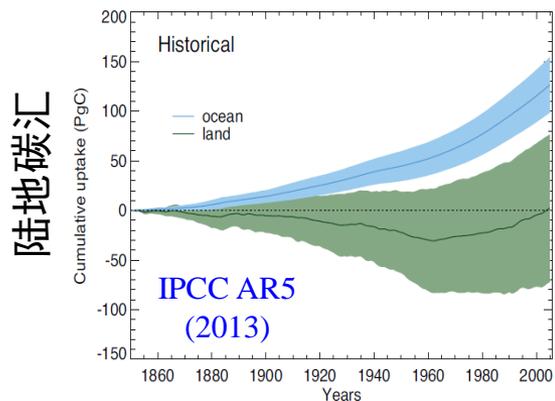
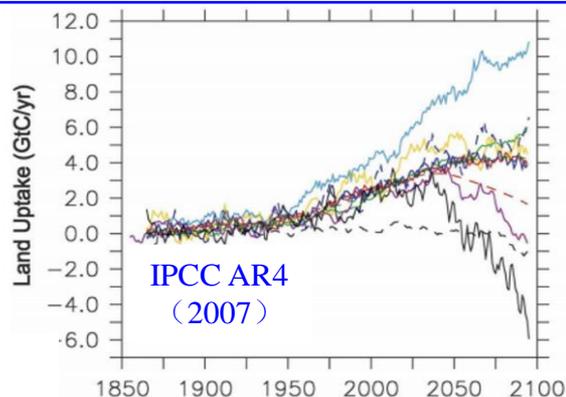
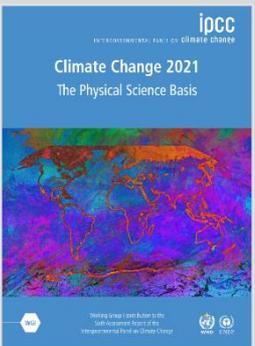
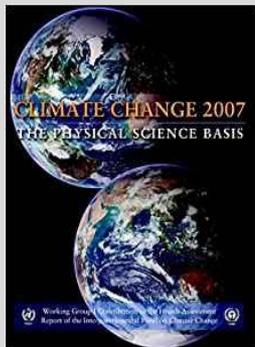
# 陆地生态系统的碳汇功能

陆地生态系统是全球碳循环中最大的自然碳汇，约抵消人类化石燃料排放总量的三分之一



(2010-2019均值; 单位: 十亿吨) Friedlingstein *et al.*, 2020 *Earth System Science Data*

# 陆地碳汇功能的预测存在较高的不确定性

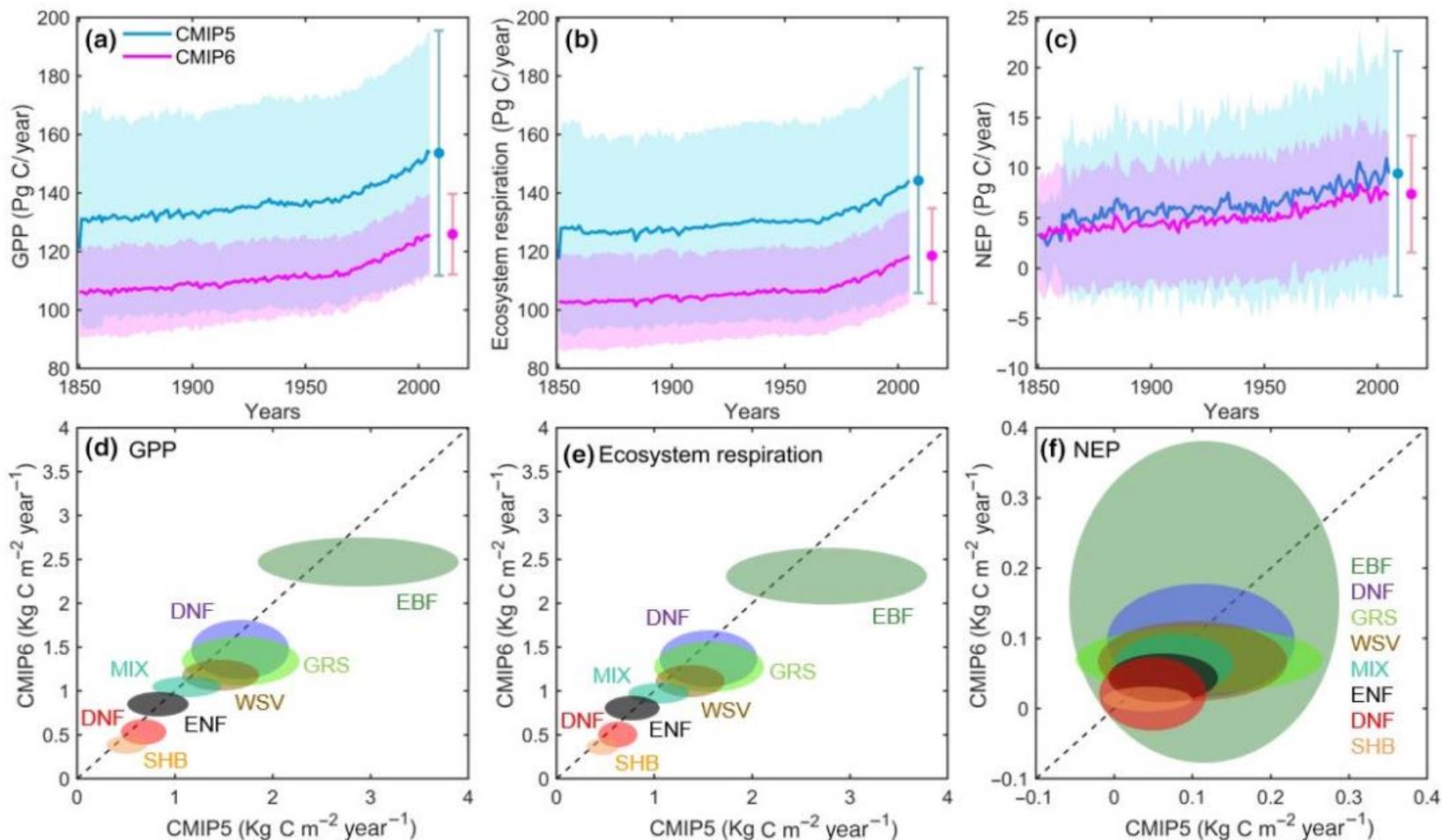


## 陆地碳汇功能的预测

- 陆地生态系统碳汇的预测主要来自**地球系统模型**
- 不同地球系统模型对未来全球陆地碳汇的预测在方向和强度上长期**存在巨大差异**
- 陆地碳汇功能呈现出**减弱的趋势**

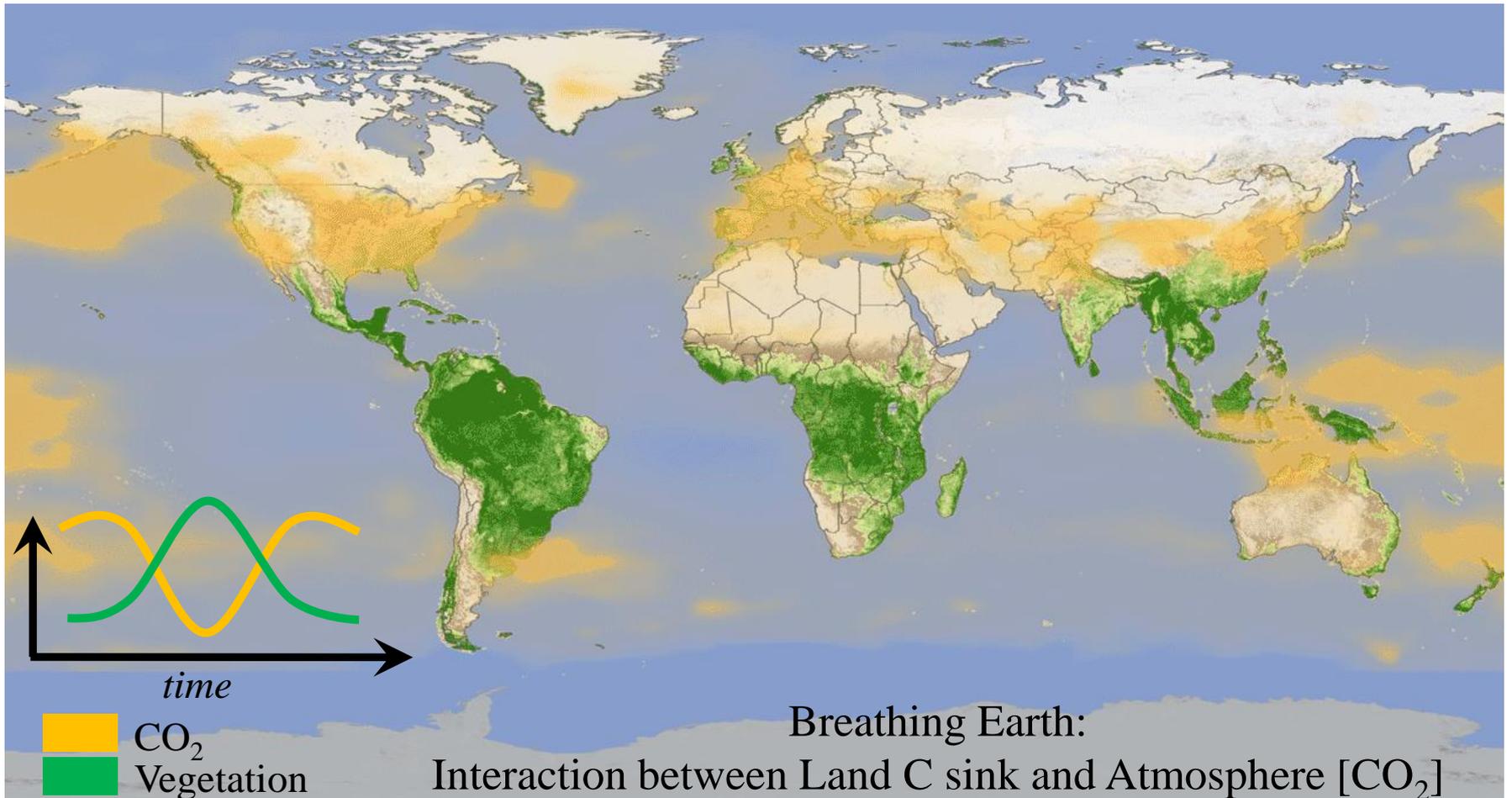
# 理解碳循环模拟的不确定性具有科学意义

- 地球系统模型为全球的生态学新现象提供了机理解释工具
- 理解模型之间的差异来源有助于更准确的理解地球系统的内在机制



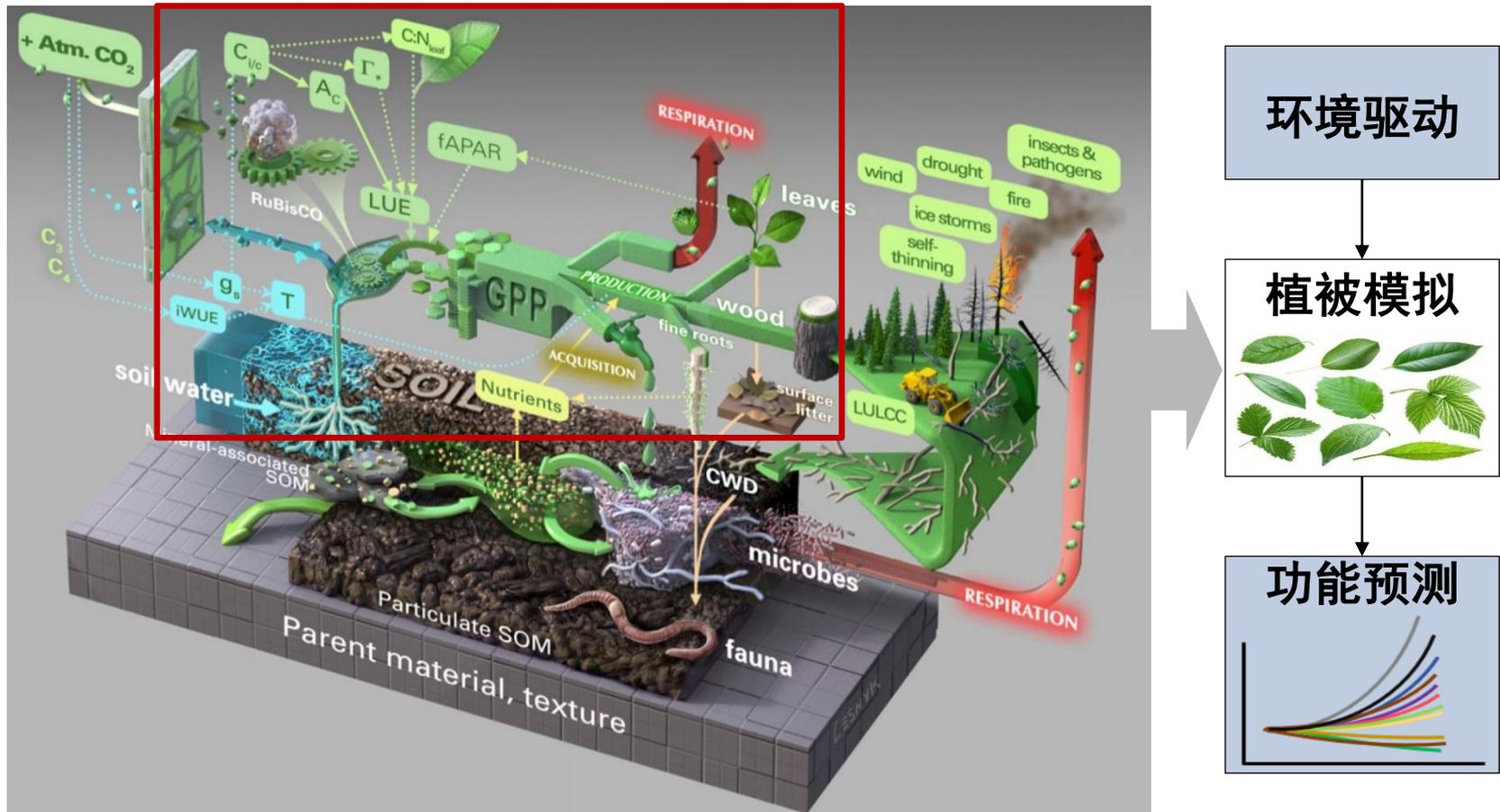
# 植物是陆地碳汇的主要贡献者

- 植物是陆地碳循环主要参与者和生态系统碳汇的主要贡献者
- 准确模拟陆地植物及其碳循环过程对预测气候变化至关重要



# 植物功能性状是准确刻画陆地植物的关键参数

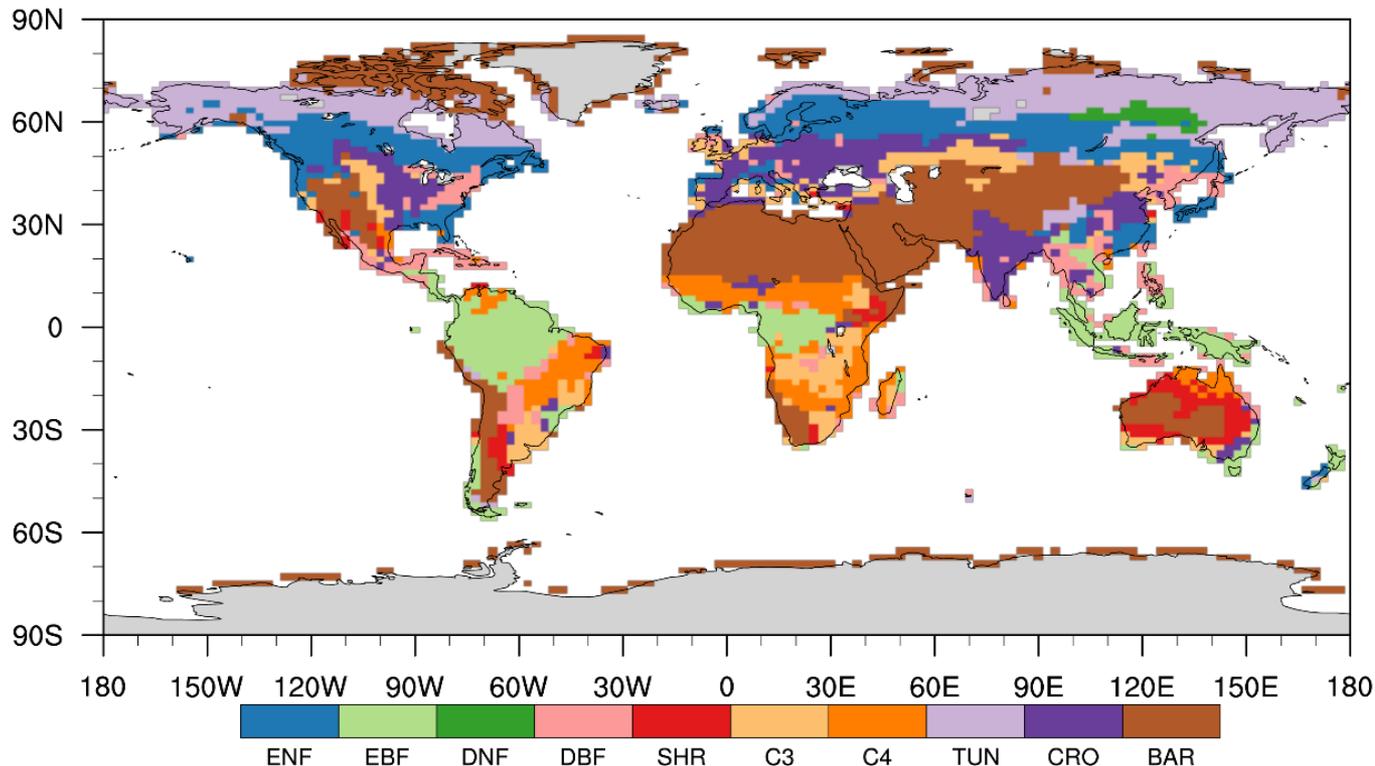
植物功能性状 (Plant functional traits)：与植物生存、生长和繁殖紧密相关的植物性状，能够反映植物对环境变化的响应并且可以影响生态系统功能



# 模型中植被及其功能性状的表征

植物功能型（PFT, plant functional type）：模型中一般以植物功能型作为植被分类单元，不同植物功能型对应不同的过程和参数

□ 基于单一植物功能型的模型: PFT-based model



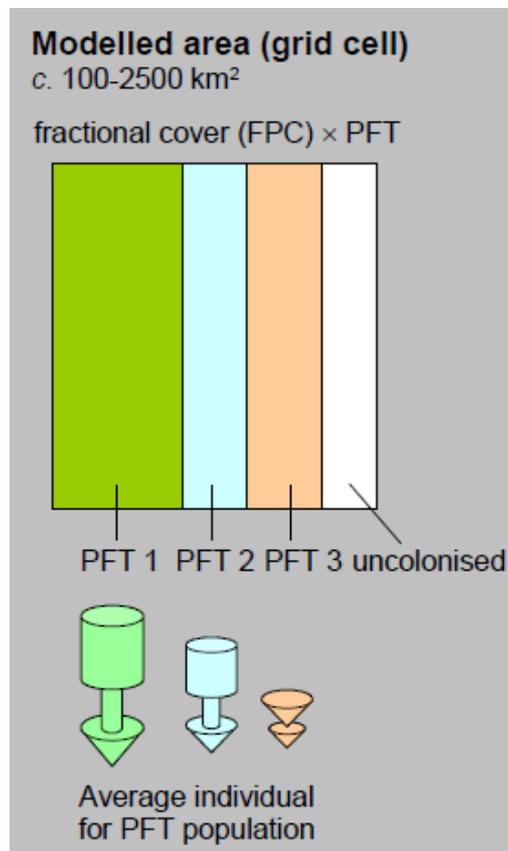
- 每个模拟单元（栅格）定义为一种PFT类型
- 每一种PFT类型赋予一组典型的植物功能性状值

# 模型中植被及其功能性状的表征

## □ 基于植物功能型/物种组成的模型: Population-based model

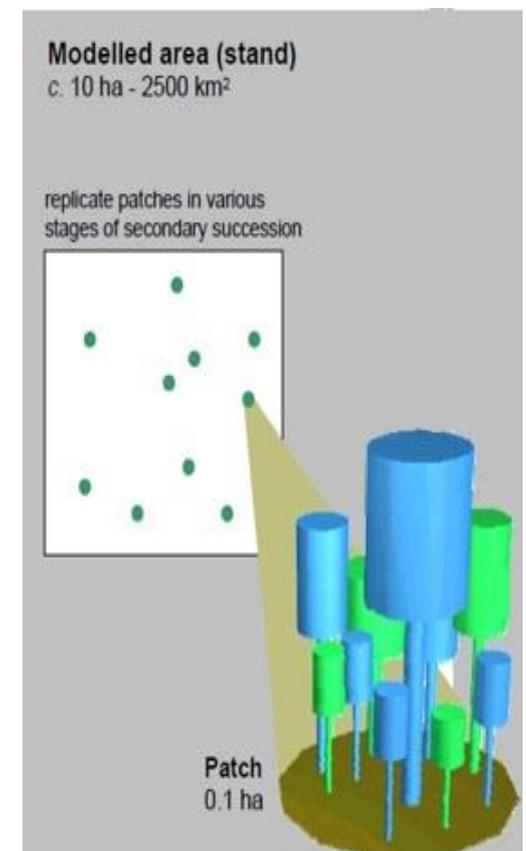
### “Population Mode”

- PFTs
- Simplistic veg dynamics
- No cohorts
- Coarse



### “Individual/Cohort Mode”

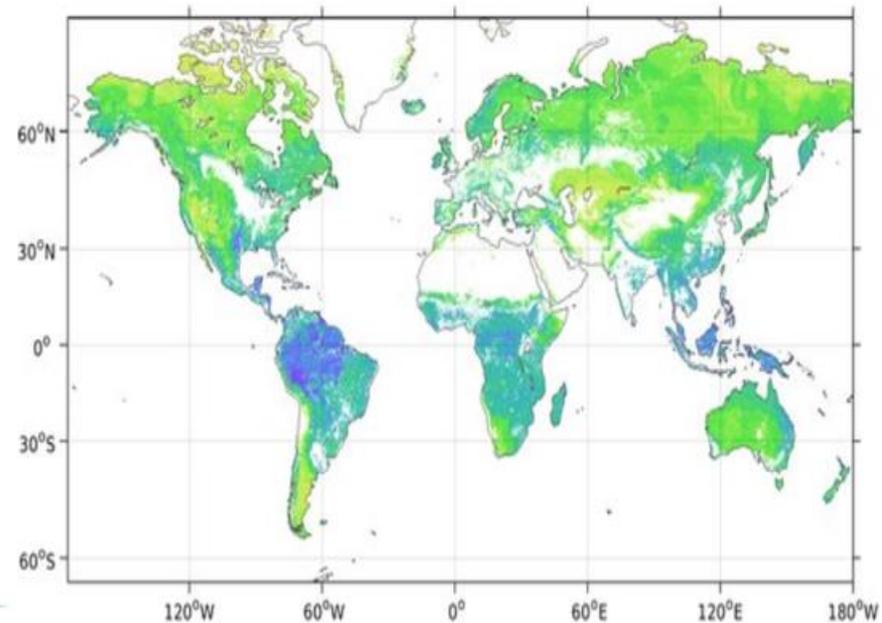
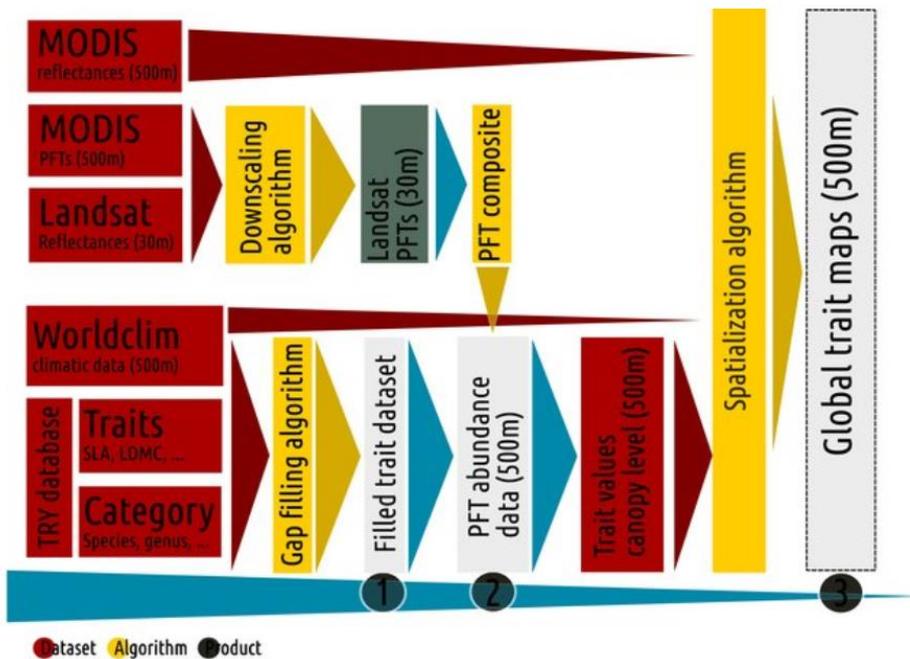
- PFTs or species
- ‘Gap’ veg dynamics
- Cohorts
- Fine



# 植被动态特征的模拟：静态-动态植被

## □ 植被模拟分为静态和动态两种模式

- 静态模式：植被分布和相应功能性状均为固定值
- 动态模式：一般植被分布为动态模式，相应功能性状为固定值

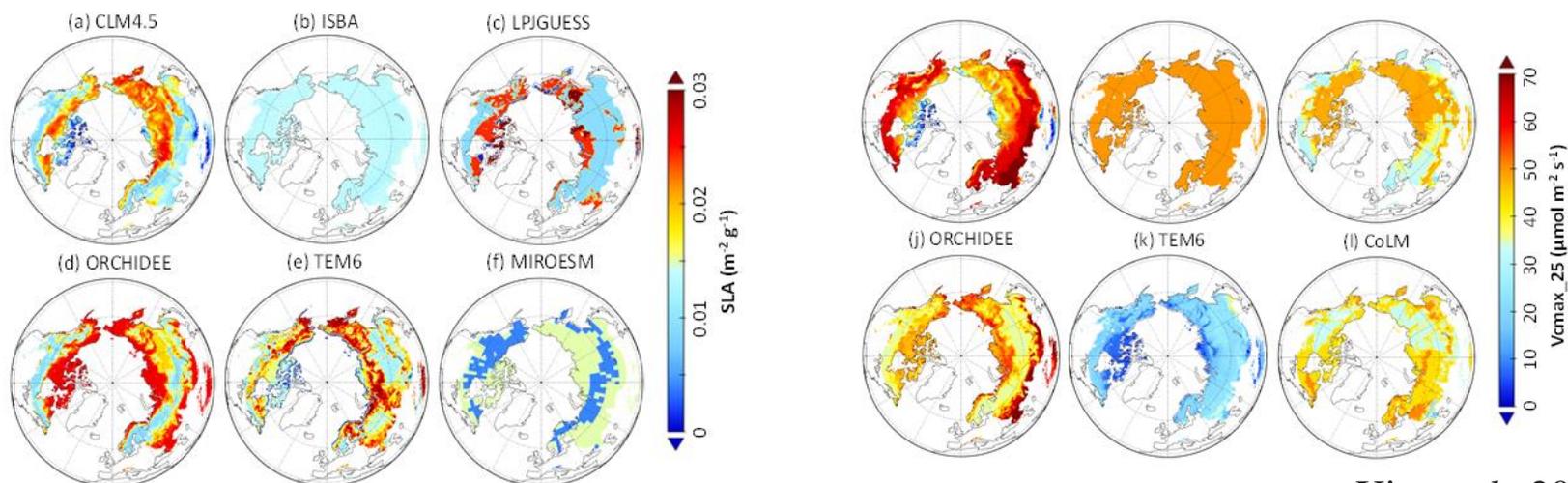


# 模型中植物功能性状的表征呈现巨大差异

表 1-1 陆地生态系统模型中植物功能型的划分与性状参数。

Table 1-1 The plant functional types and leaf traits in terrestrial ecosystem models.

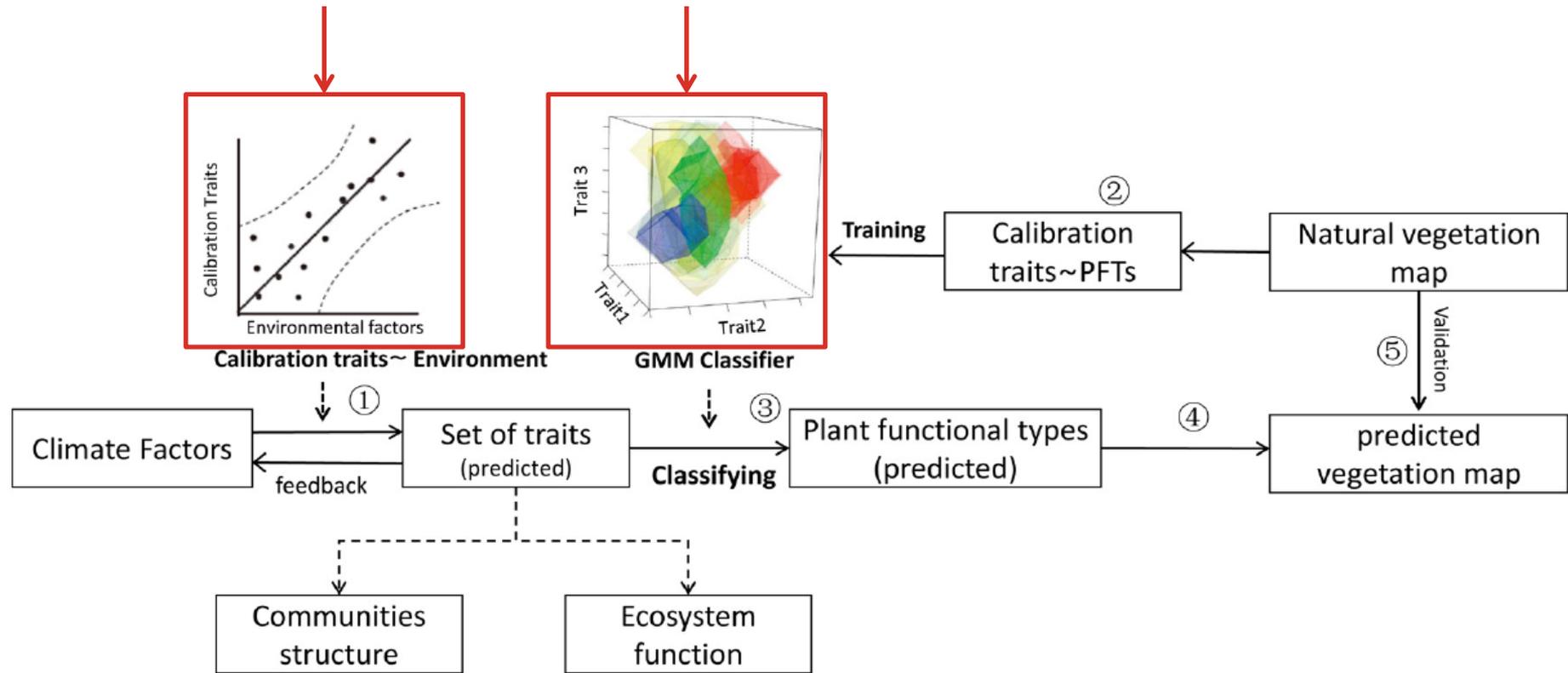
模型	植物功能型	SLA ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )	$V_{\text{cmax}}$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	参考文献
CABLE	17	177-280	10-80	Wang et al., 2012
ORCHIDEE	12	93-260	35-70	Krinner et al., 2005
LPJ-GUESS	14	9-324	-	Smith et al., 2001
CLM45	15	80-300	39-101	Koven et al., 2013
CoLM	15	217-411	17-51	Ji et al., 2014
TEM6	15	120-300	14-95	Hayes et al., 2011
MIROC-ESM	10	40-160	-	Watanabe et al., 2011
UW-Vic	14	-	8-160	Bohn et al., 2007
ISBA	5	122-148	50	Gibelin et al., 2006
JULES	5	-	26-58	Clark et al., 2011



# 基于植物功能性状的生态系统功能预测

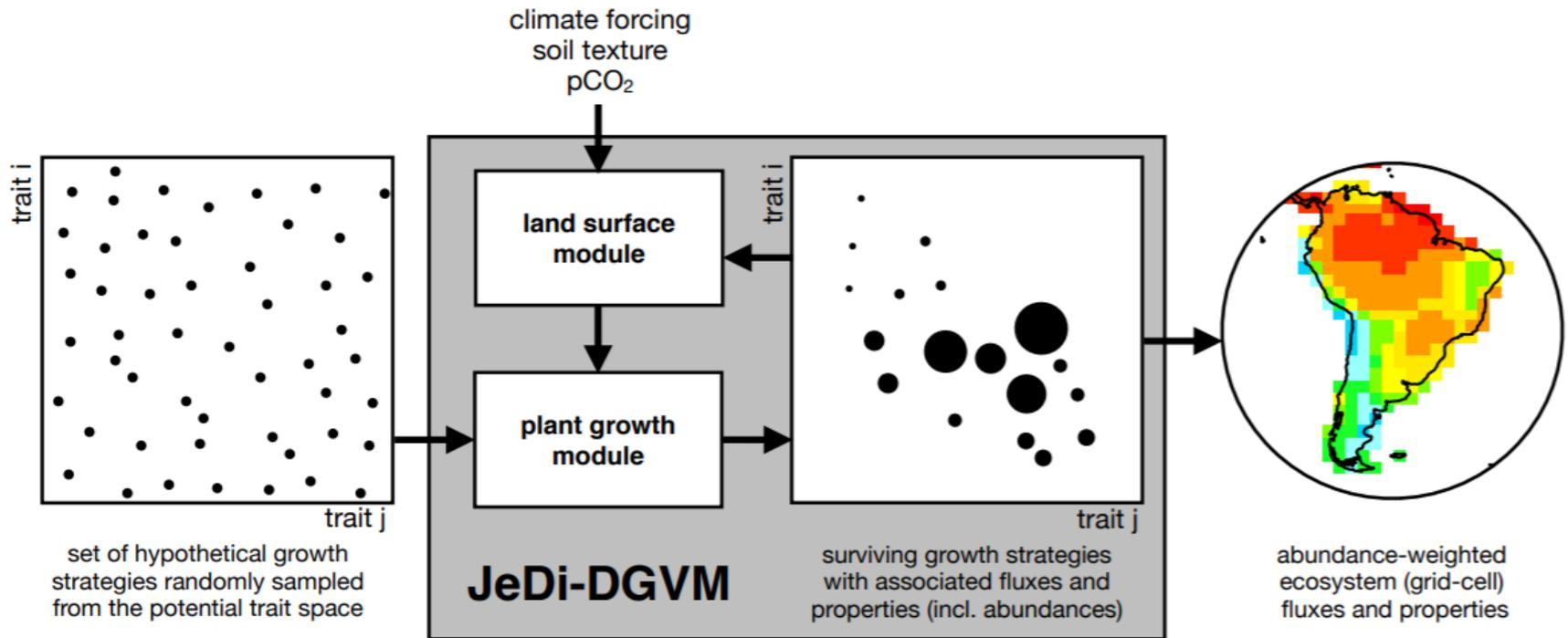
## 基于植物功能型和性状的混合模型 (PFT and trait-based model)

借助性状-环境和性状间衡关系对模型进行参数化并辅助植物功能型的划分



# 基于植物功能性状的生态系统功能预测

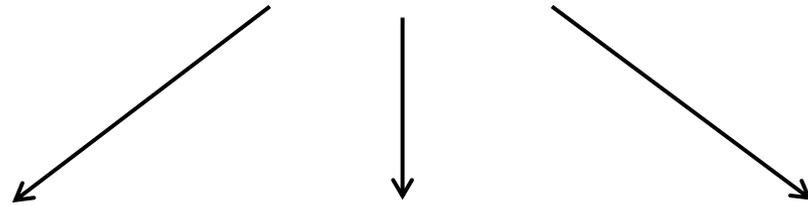
## □ 基于植物功能性状的模型: Trait-based model



- 用15组代表植物生理生态特征、物候和碳分配等功能的性状组合表征不同的生态系统策略
- 不同策略受外界环境和气候作用的限制筛选, 从而生成不同的生态系统结构和策略, 巧妙地将植物功能性状与环境的关系融入模型

# 科学问题

科学挑战：基于植物性状能否改进生态系统功能预测的不确定性？



问题 1.

植物性状对功能模拟的不确定性是否有贡献？

问题 2.

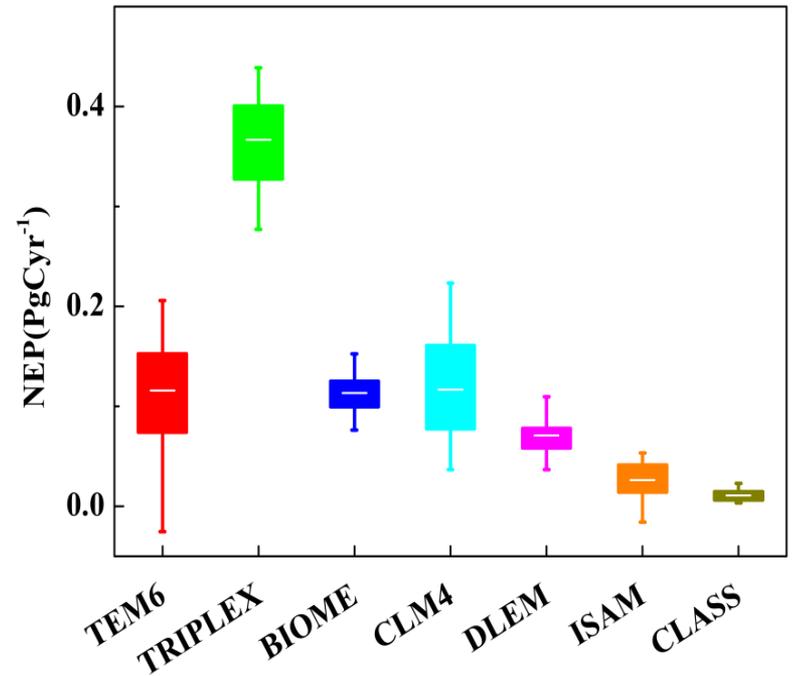
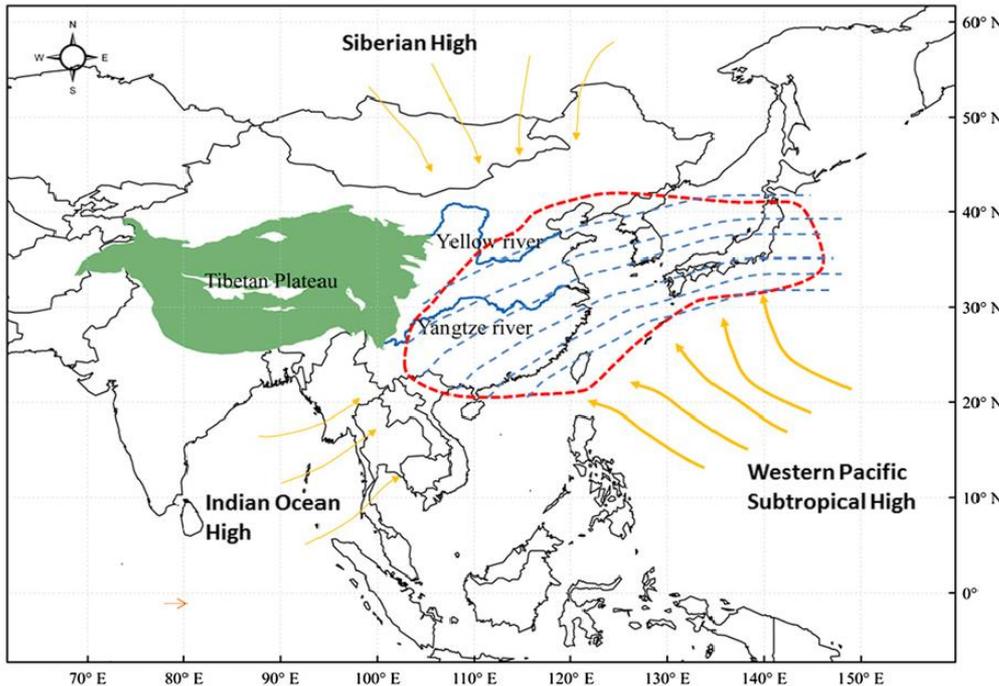
基于植物功能性状预测生态系统功能是否可行？

问题 3.

如何基于通量观测连接个体性状与生态系统功能？

# 问题1 植物功能性状是否对功能模拟的不确定性有贡献？

## 研究案例: 东亚季风区生产力模拟不确定性来源及植物功能性状的贡献



东亚季风区的亚热带森林每年碳汇总量为 $0.72 \text{ PgC}$ ，约占全球森林碳汇的8%

现有生态系统模型对该区域碳汇的模拟存在巨大差异

准确溯源该区域生产力模拟的不确定性对评估全球碳循环及碳汇功能至关重要

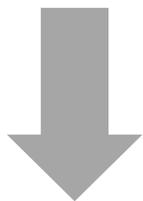
# 构建生态系统生产力模拟不确定性评估框架

## □ 生产力模拟的主要特点：

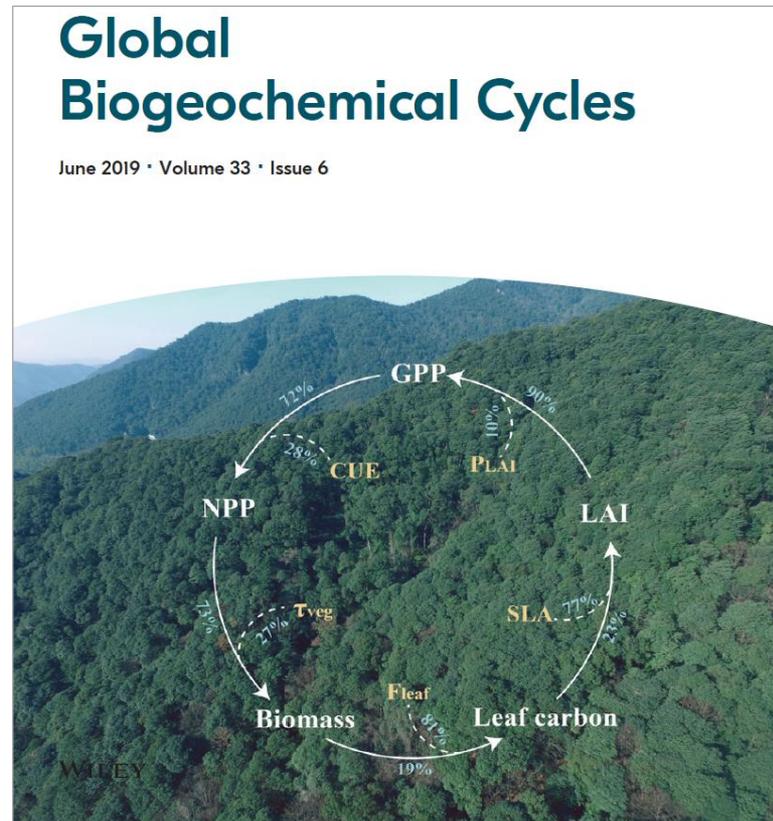
- 涉及过程变量复杂
- 各个过程互相依赖，不断反馈

## □ 当前主要解决途径：模型比较与评估计划

- 存在的问题：孤立的探讨生产力模拟差异，忽略与其他关键碳过程和植被属性的联系，难以确定差异来源



构建生产力模拟不确定性评估框架



**CUE:** C-use efficiency

**$\tau_{veg}$ :** vegetation carbon turnover time

**$F_{leaf}$ :** leaf C fraction

**SLA:** specific leaf area

**$P_{leaf}$ :** leaf-level photosynthesis

# MsTMIP模型比较计划

- 基准模拟值 → 固定环境驱动 **模型结构**

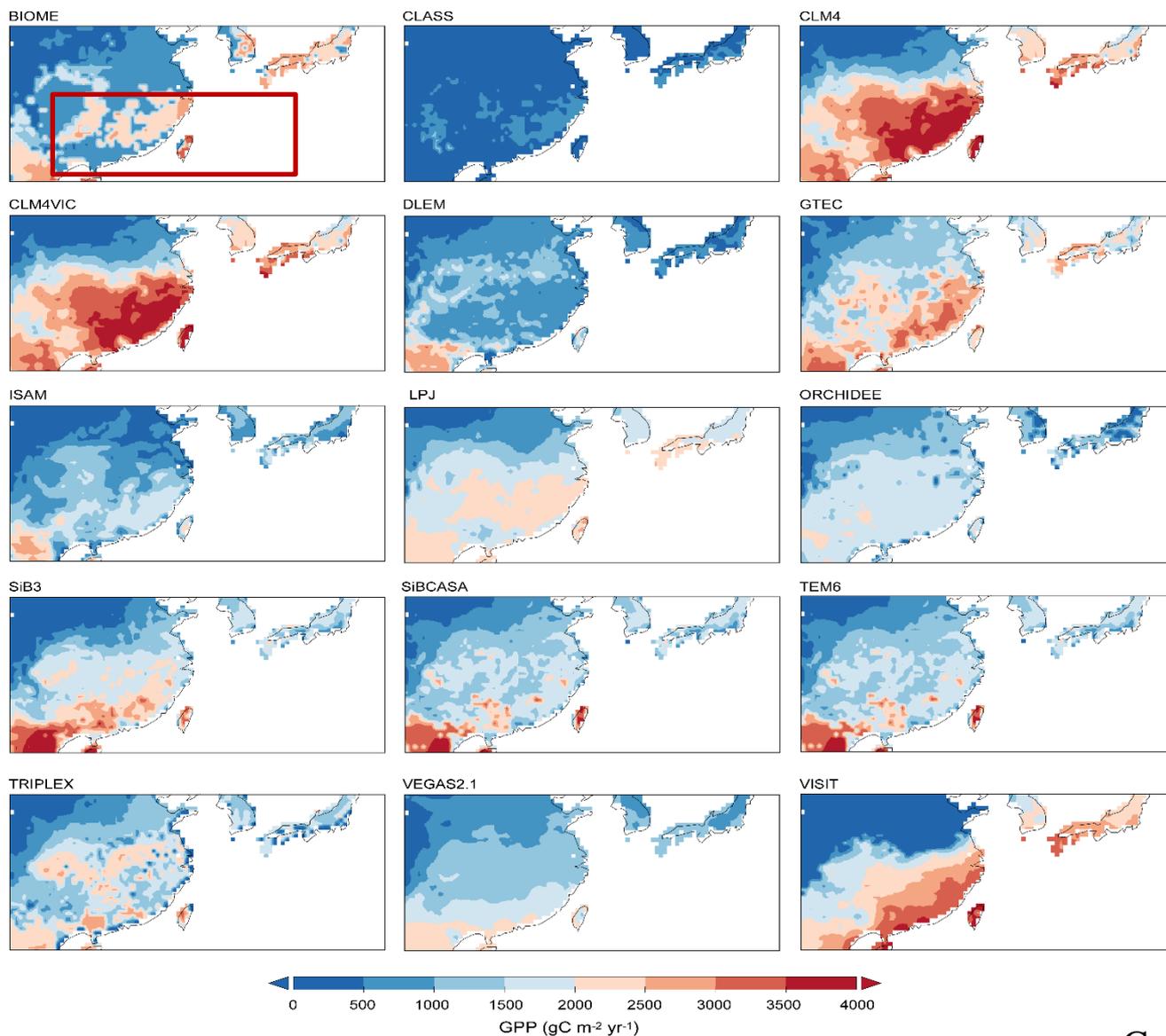
Order	Domain	Scenario	Climate	LULUC	Atm. CO <sub>2</sub>	Nitrogen
1		RG1	Constant	Constant	Constant	Constant
2		SG1	Time-varying (CRU+NCEP)			
3		SG2		Time-varying (Hurtt)		
4		SG3			Time-varying	
5		BG1		Time-varying		

- 不同模拟情景 → 依次递增环境变化因子 **环境响应**

Model sensitivity to changing environmental drivers:

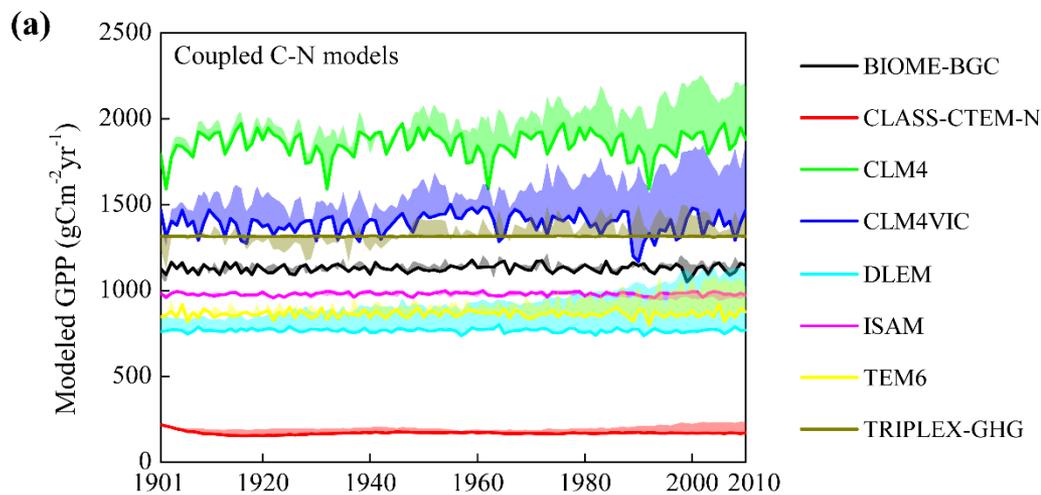
- Climate (SG1 - RG1)      Land-use land-cover change (SG2 - SG1)
- Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations (SG3 - SG2)      Nitrogen deposition (BG1 - SG3)

# 模型间东亚季风区生产力模拟存在巨大差异

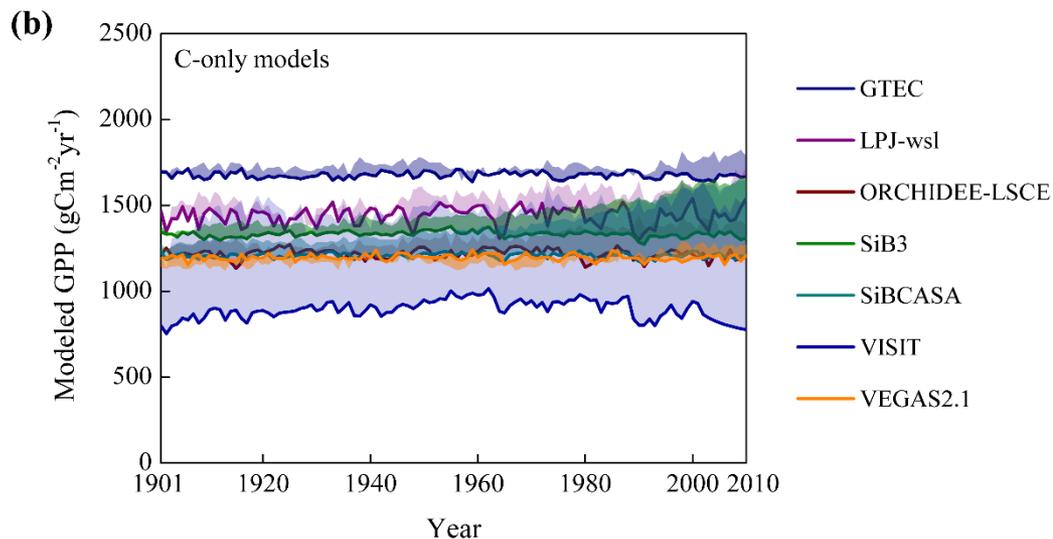


# 模型初始模拟值主导了模型的模拟差异

碳-氮耦合模型

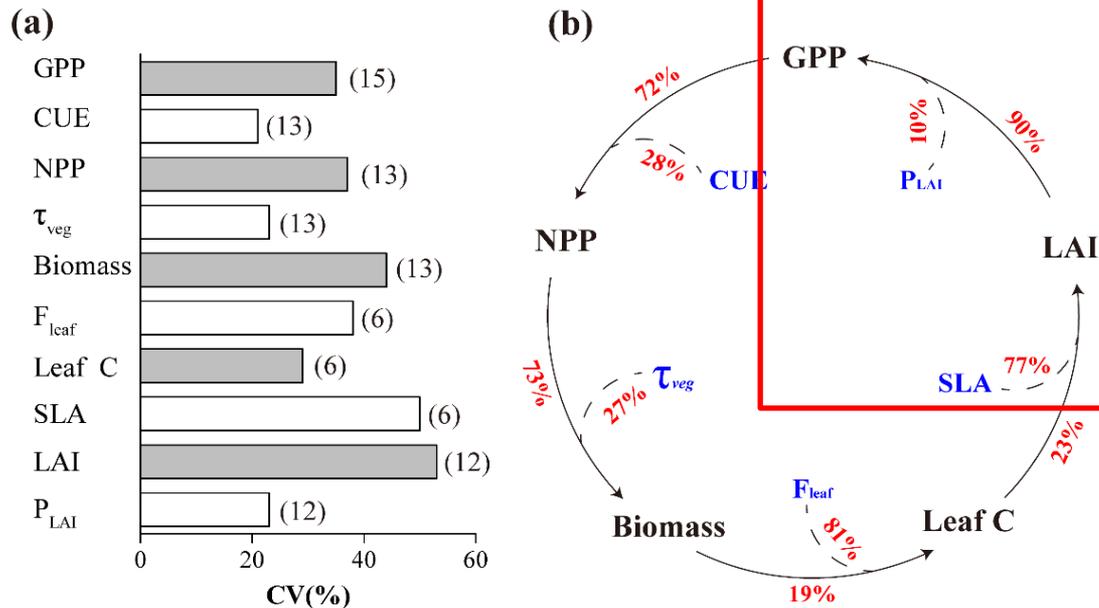


碳循环模型

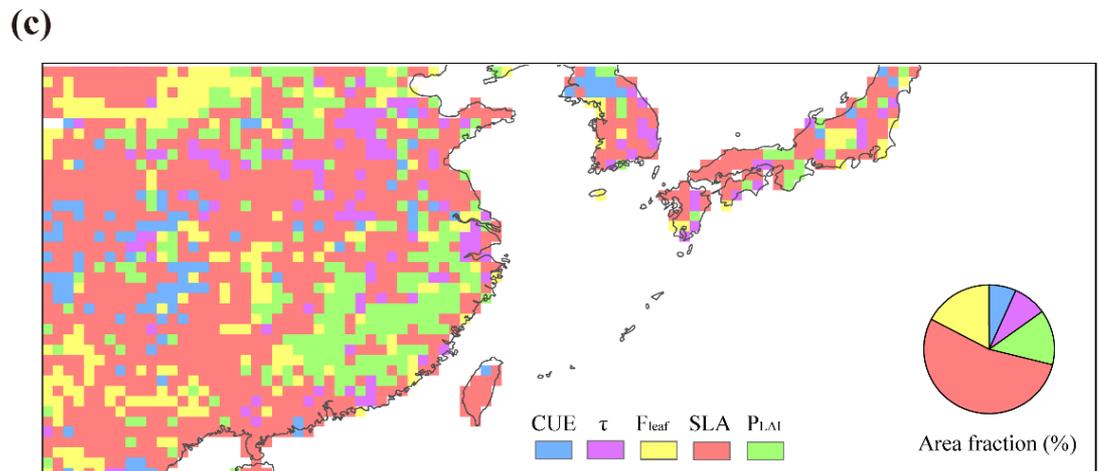


注：模型初始模拟值(实线)  
环境响应值(阴影)

# 植物功能性状对生产力模拟差异的贡献

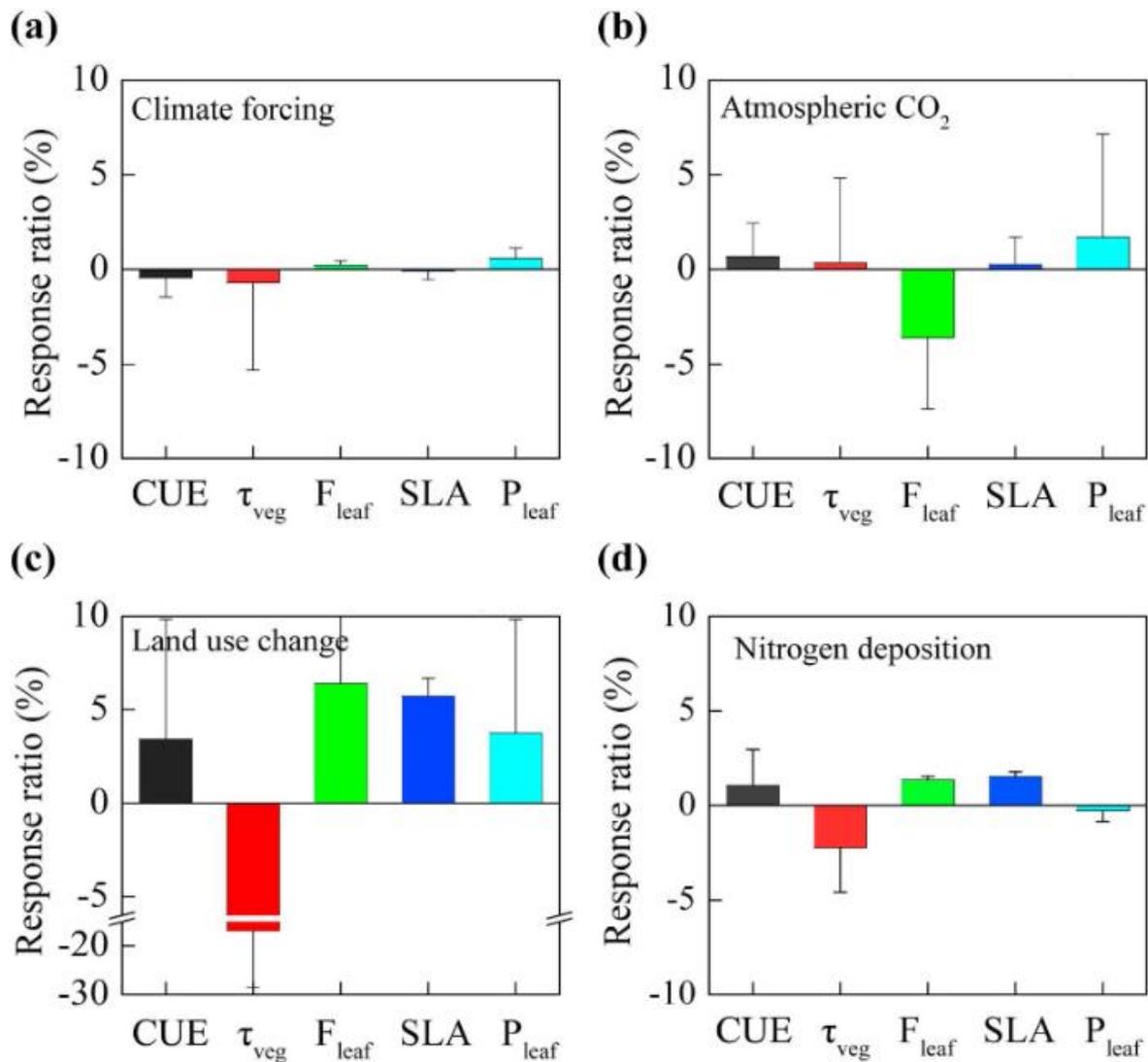


模型间植物叶片功能性状  
(尤其是比叶面积和叶面积指数) 的表征差异主导了生产力的模拟差异



SLA (54%)  
 $F_{leaf}$  (17%)  
 $P_{LAI}$  (14%)

# 模型中植物功能性状对环境因子响应较小



# 小结：植物功能性状对生产力模拟不确定性贡献

## □ 主要发现：

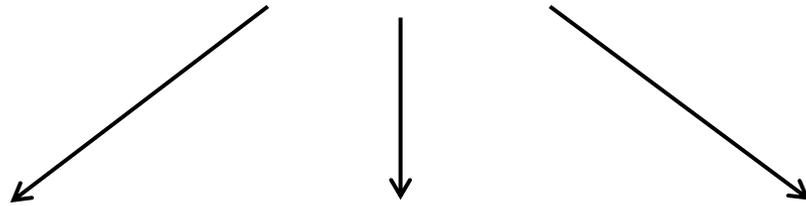
- 模型间植物叶片功能性状（尤其是比叶面积和叶面积指数）的表征差异主导了生产力的模拟差异
- 模型中植物功能性状主要受土地利用变化影响，对环境因子响应较小

## □ 科学意义：

- 基于植物功能性状，构建了生态系统生产力模拟不确定性评估框架，有效地拓展了“溯源性分析”的研究框架
- 提高对植物功能性状的表征将有助于降低模型间生产力模拟差异。同时，未来模型的发展需要进一步考虑植物功能性状对环境变化的响应及其引起的生态系统结构和功能的变化

# 科学问题

科学挑战：基于植物性状能否改进生态系统功能预测的不确定性？



问题 1.

植物功能性状对功能模拟的不确定性是否有贡献？

问题 2.

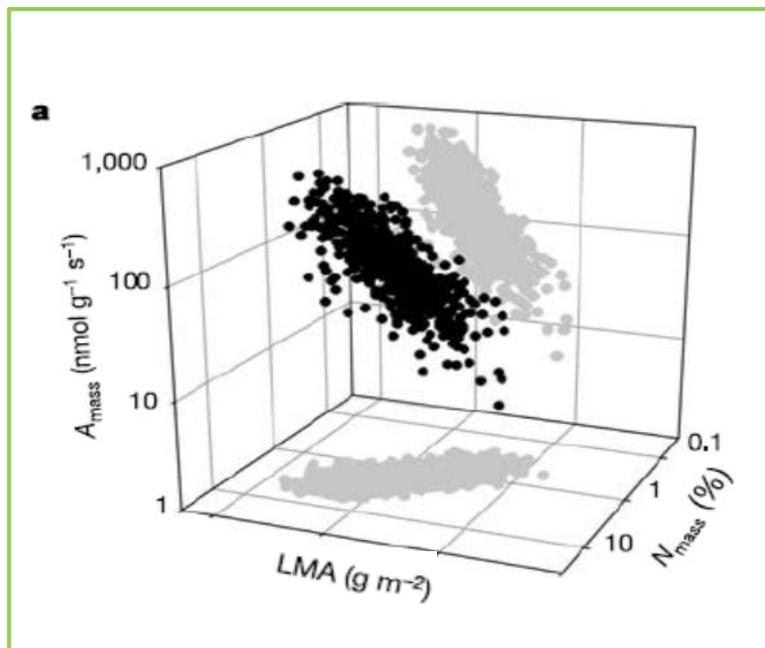
基于植物功能性状预测生态系统功能是否可行？

问题 3.

如何基于通量观测连接个体性状与生态系统功能？

## 问题2 基于植物功能性状预测生态系统功能是否可行？

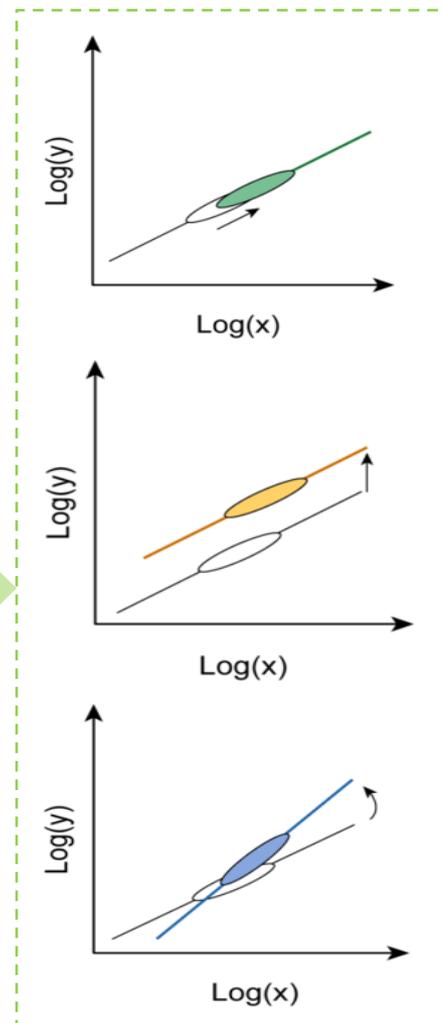
研究案例: 环境变化是否改变叶片功能性状之间的共变关系？



$$y = cx^k$$

$$\log y = k * \log x + b; \quad b = \log c$$

$k$ : 性状间的异速指数



# 模拟实验中植物叶片功能性状数据库

增温实验



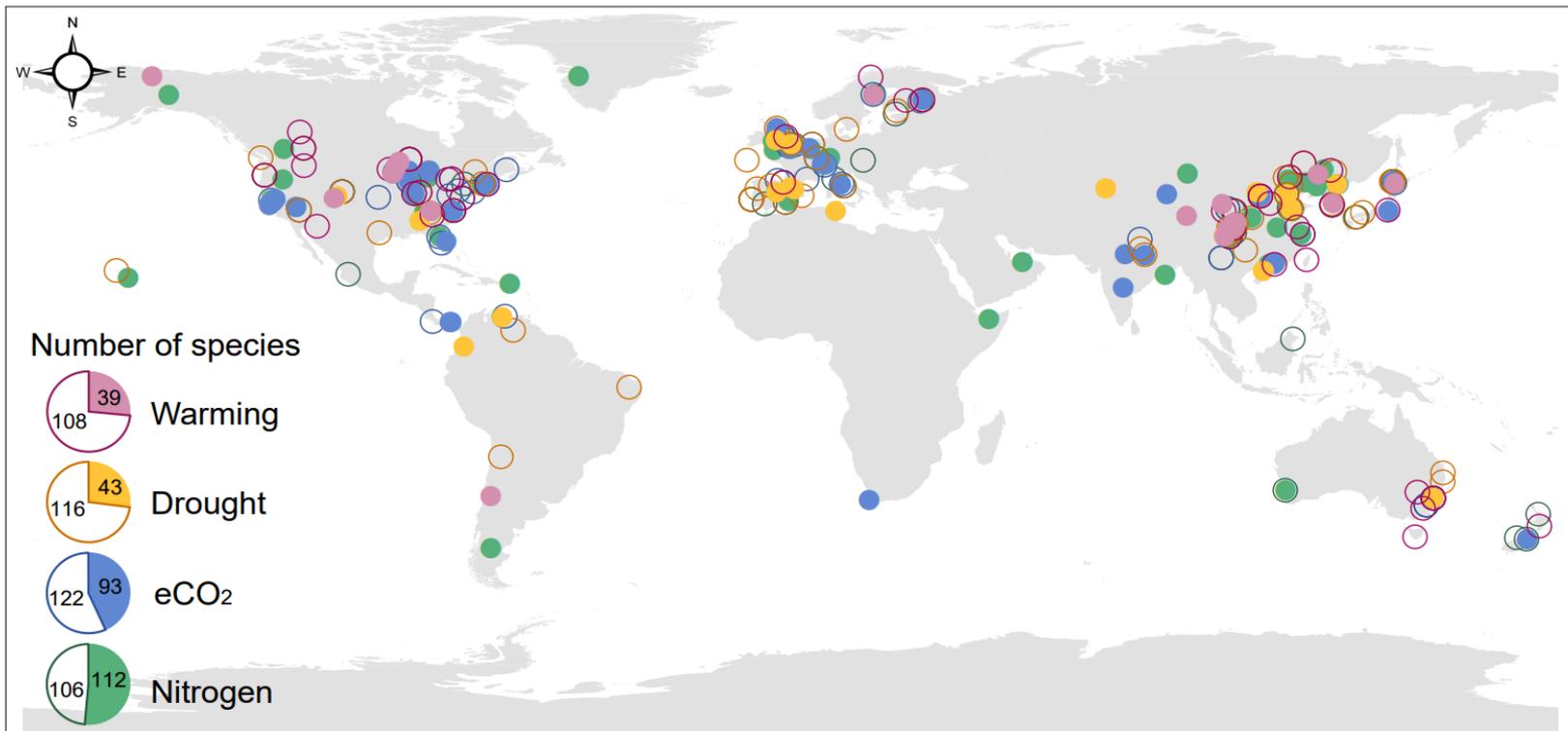
CO<sub>2</sub>施肥实验



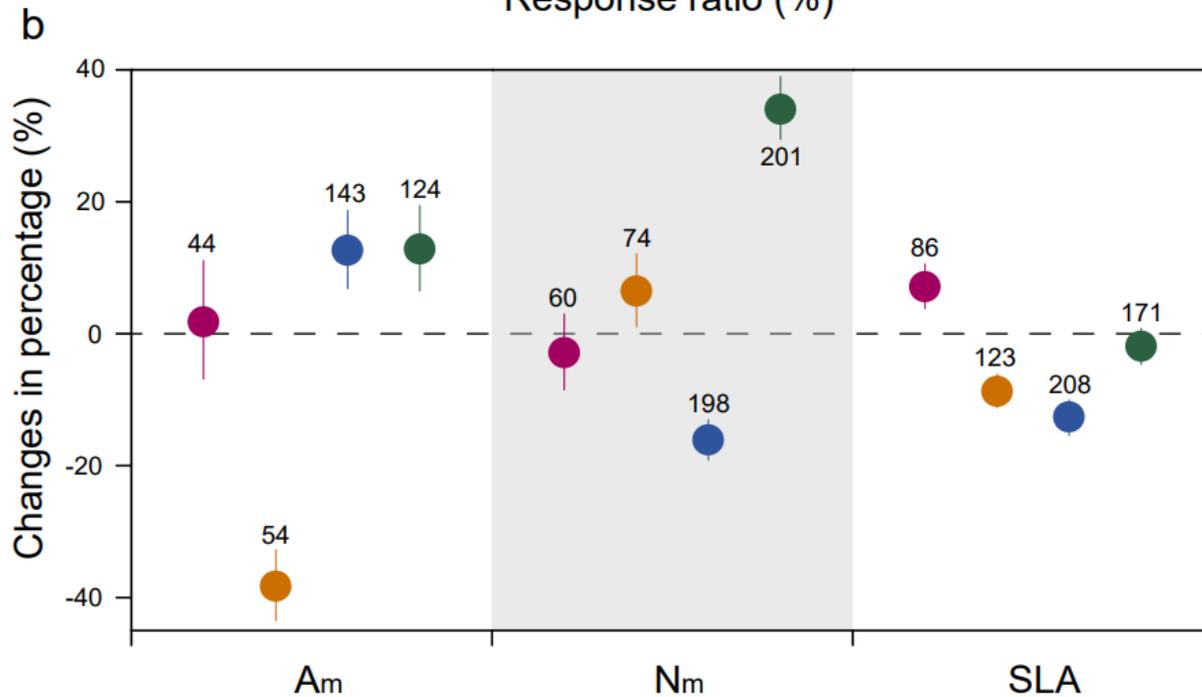
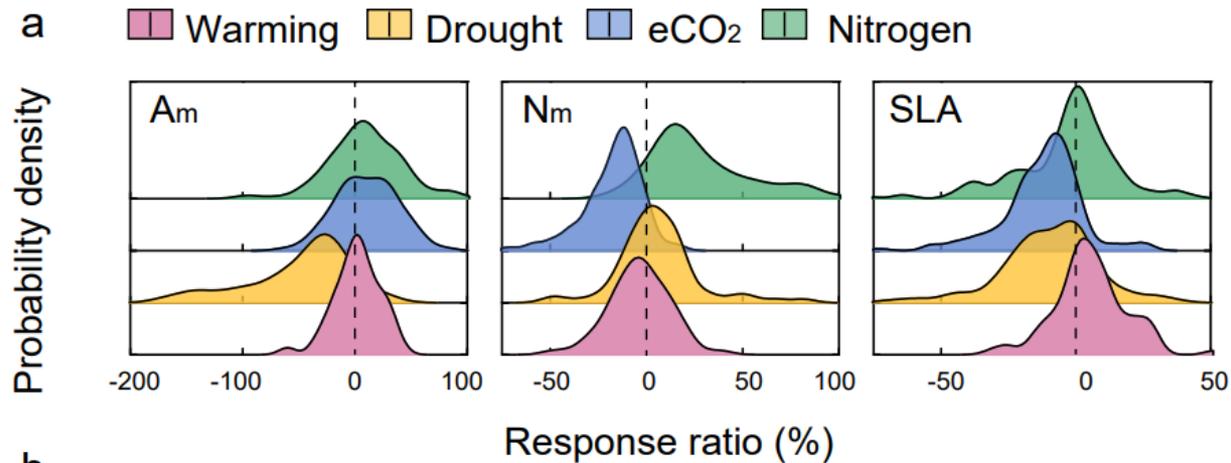
干旱实验



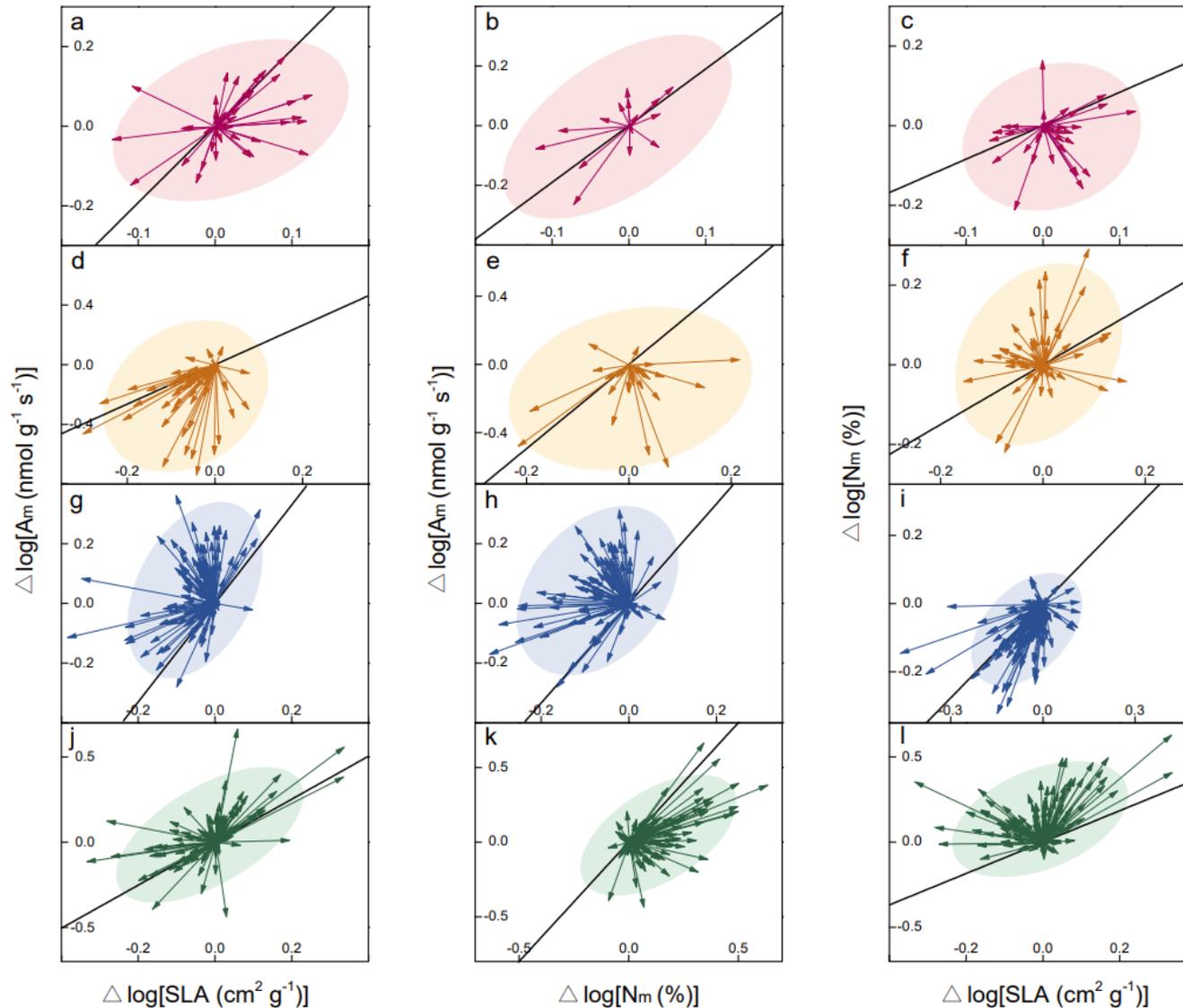
氮添加实验



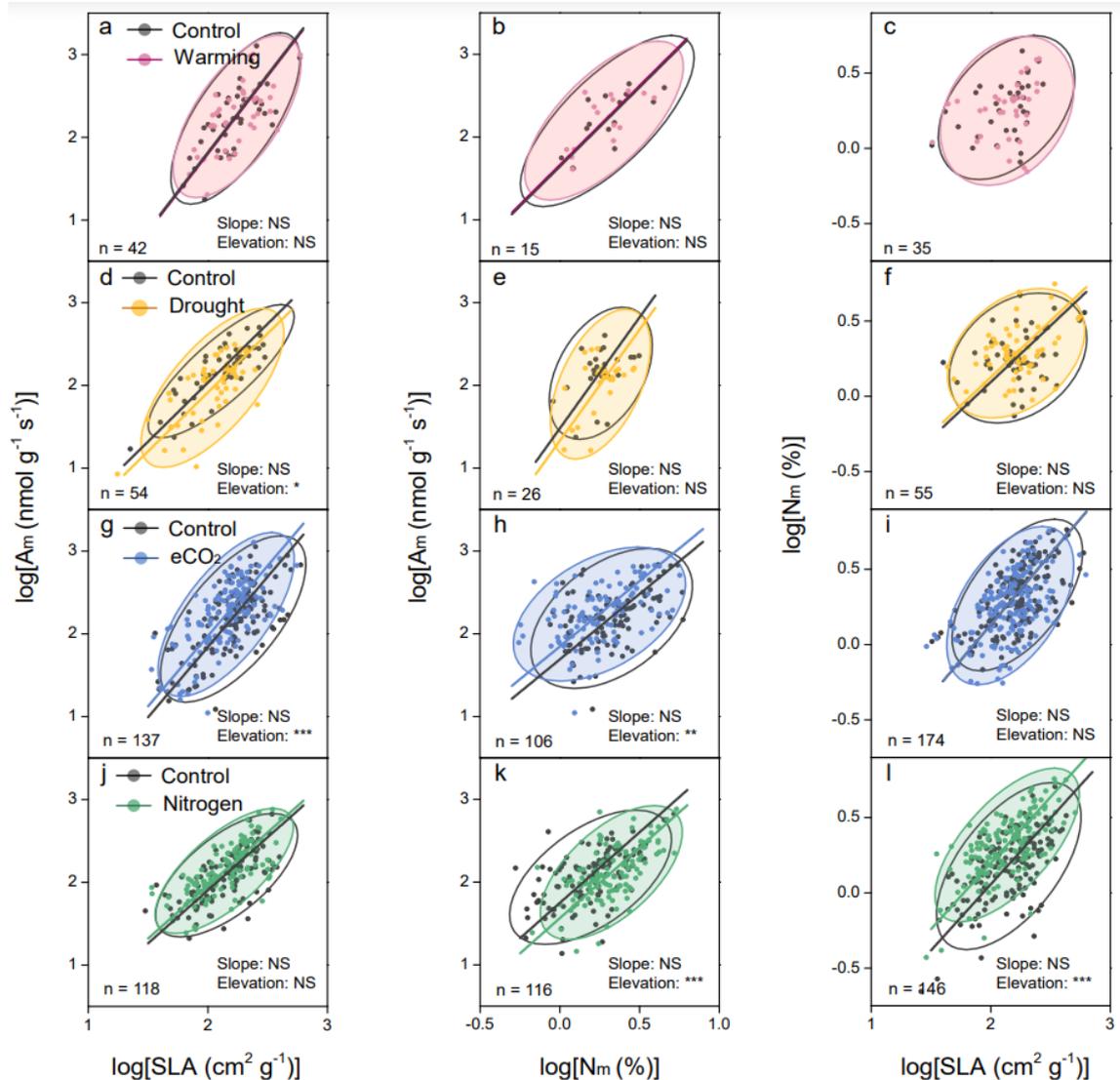
# 植物叶片功能性状对不同环境变化因子的响应



# 物种水平性状组合对环境变化的响应



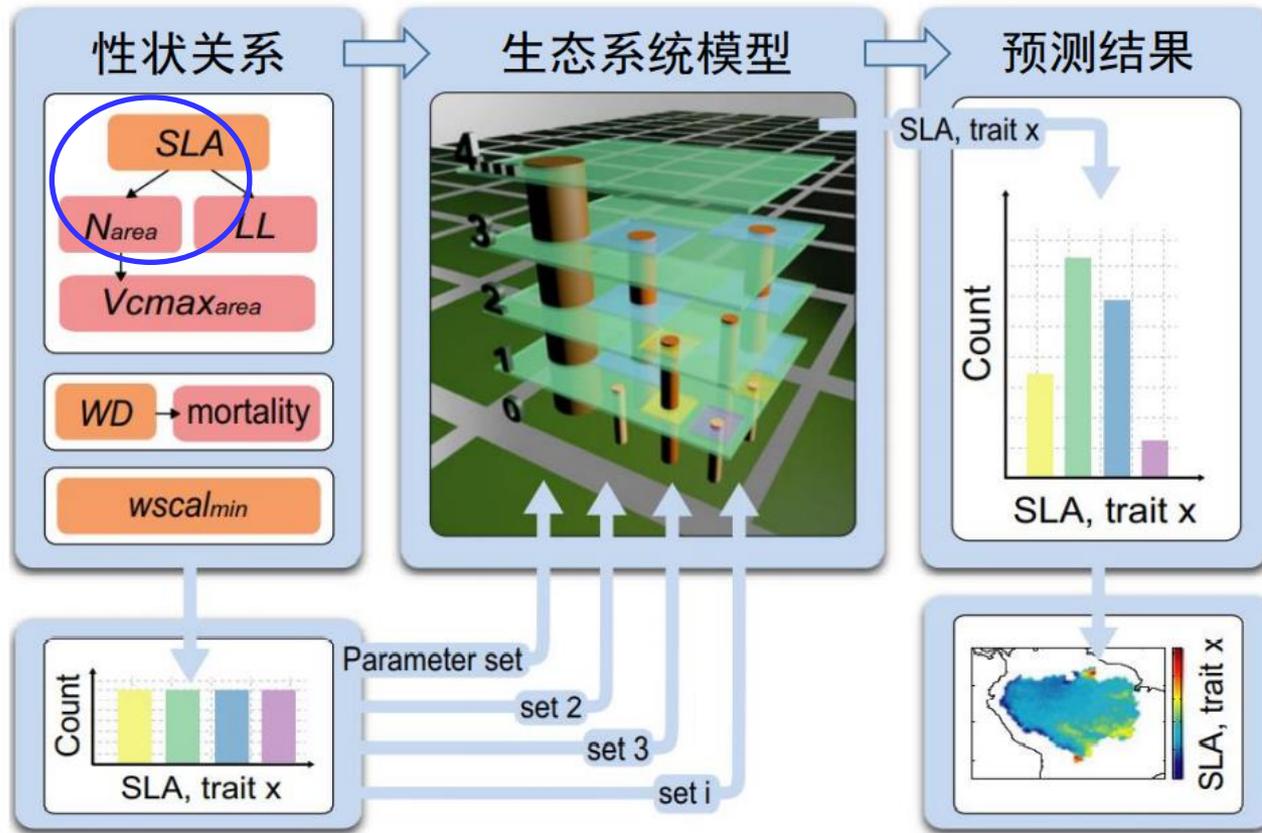
# 植物功能性状间关系在环境变化下维持稳定



环境变化下性状间的关系  
(异速指数) 维持稳定

氮添加和CO<sub>2</sub>施肥下, 性状组合初始态发生偏移

# 植物功能性状的环境可塑性如何影响功能模拟？



生态系统模型主要关注两类性状:

- 光合作用相关
  - 光合速率
  - 比叶面积
  - 叶氮含量
- 死亡相关
  - 木质部密度
  - 个体高度

# 植物功能性状的环境可塑性如何影响功能模拟？

研究案例：基于CO<sub>2</sub>施肥下植物功能性状的可塑性模拟生态系统功能的响应

模型模拟中预设情景列表

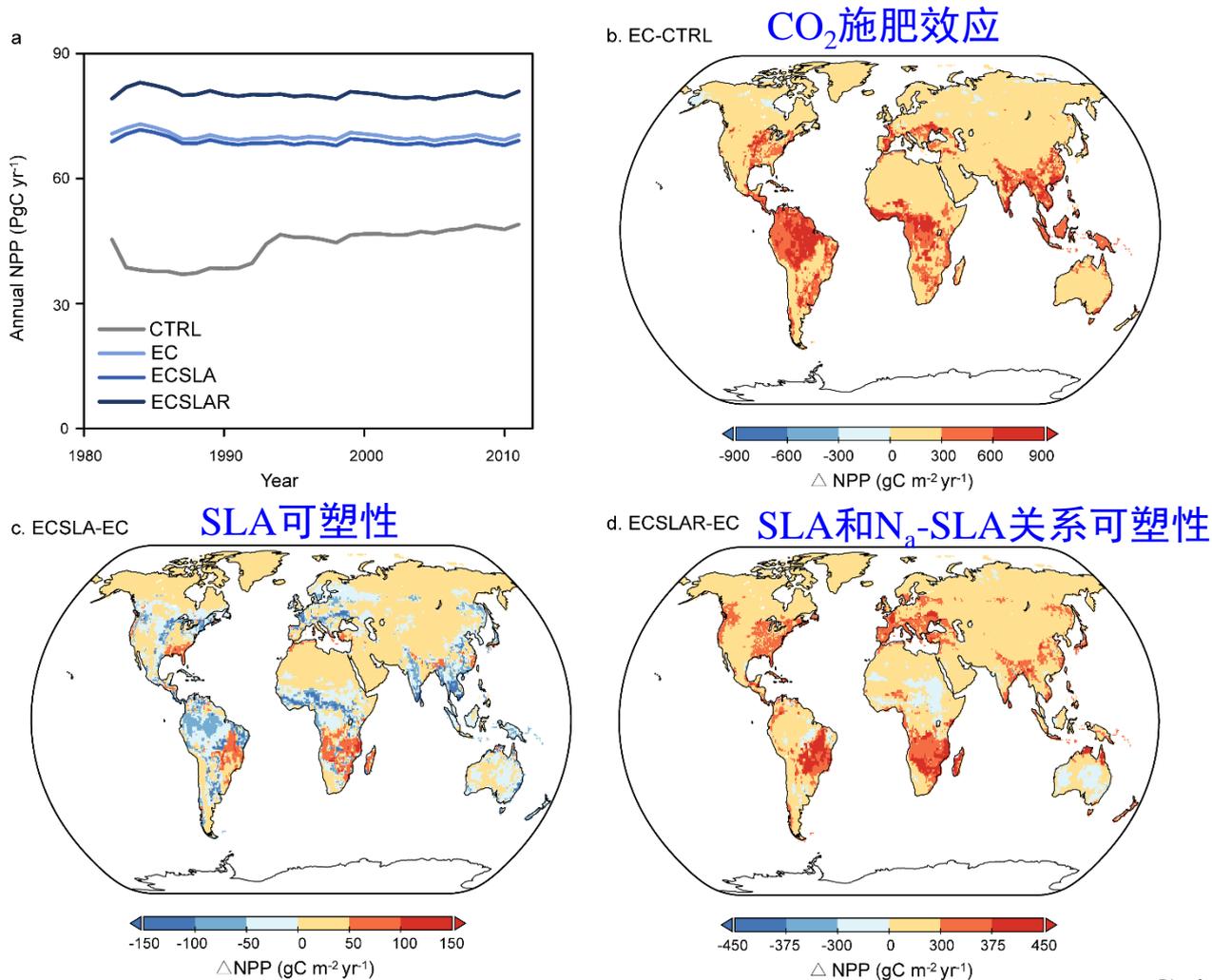
模拟情景	CO <sub>2</sub> 浓度	△SLA	经验公式	描述
CTRL	1×CO <sub>2</sub>	-	$N_a=0.033*SLA^{-0.819}$	对照组
EC	~ 1.8×CO <sub>2</sub>	-	$N_a=0.033*SLA^{-0.819}$	CO <sub>2</sub> 施肥
ECSLA	~ 1.8×CO <sub>2</sub>	-12.6%	$N_a=0.033*SLA^{-0.819}$	CO <sub>2</sub> 施肥+ SLA 可塑性
ECSLAR	~ 1.8×CO <sub>2</sub>	-12.6%	$N_a=0.045*SLA^{-0.819}$	CO <sub>2</sub> 施肥+ SLA 和 N <sub>a</sub> -SLA 可塑性

CO<sub>2</sub>施肥响应计算：

- CO<sub>2</sub> 施肥 = EC-CTRL
- SLA可塑性 = ECSLA-EC
- SLA和N<sub>a</sub>-SLA关系可塑性 = ECSLAR-EC

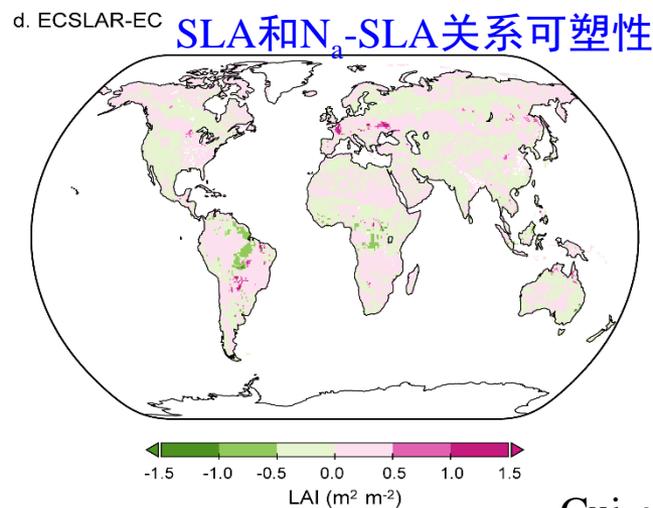
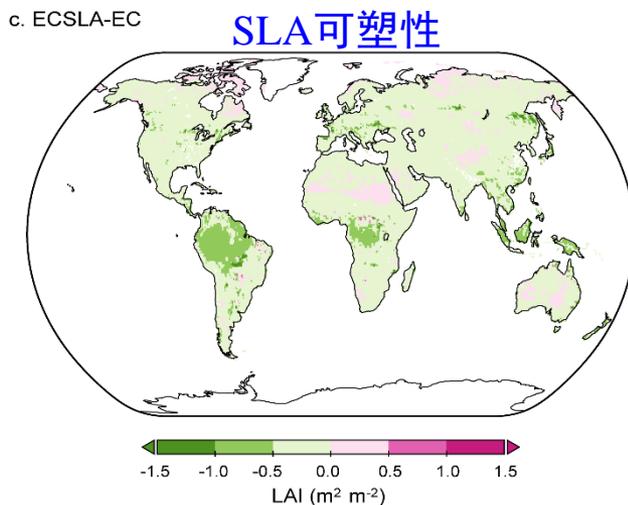
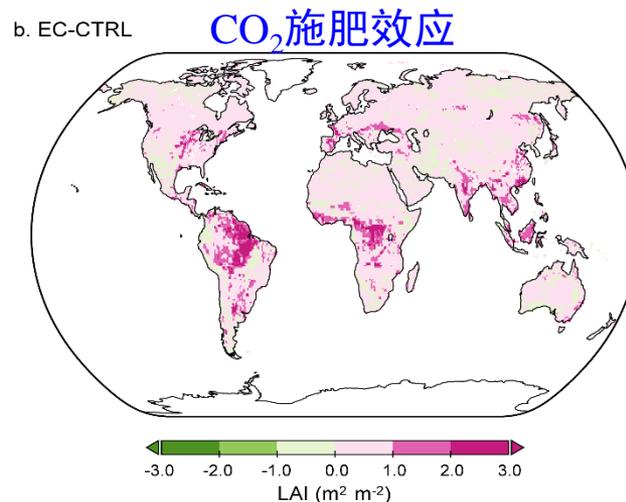
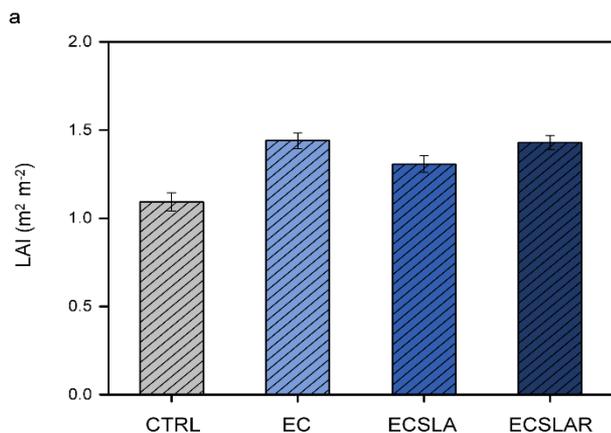
# 生物地球化学循环：植物生长的响应

SLA的可塑性导致年均NPP降低； $N_a$ -SLA关系的变化显著放大了 $CO_2$ 施肥效应，全球年均NPP额外增长了23%

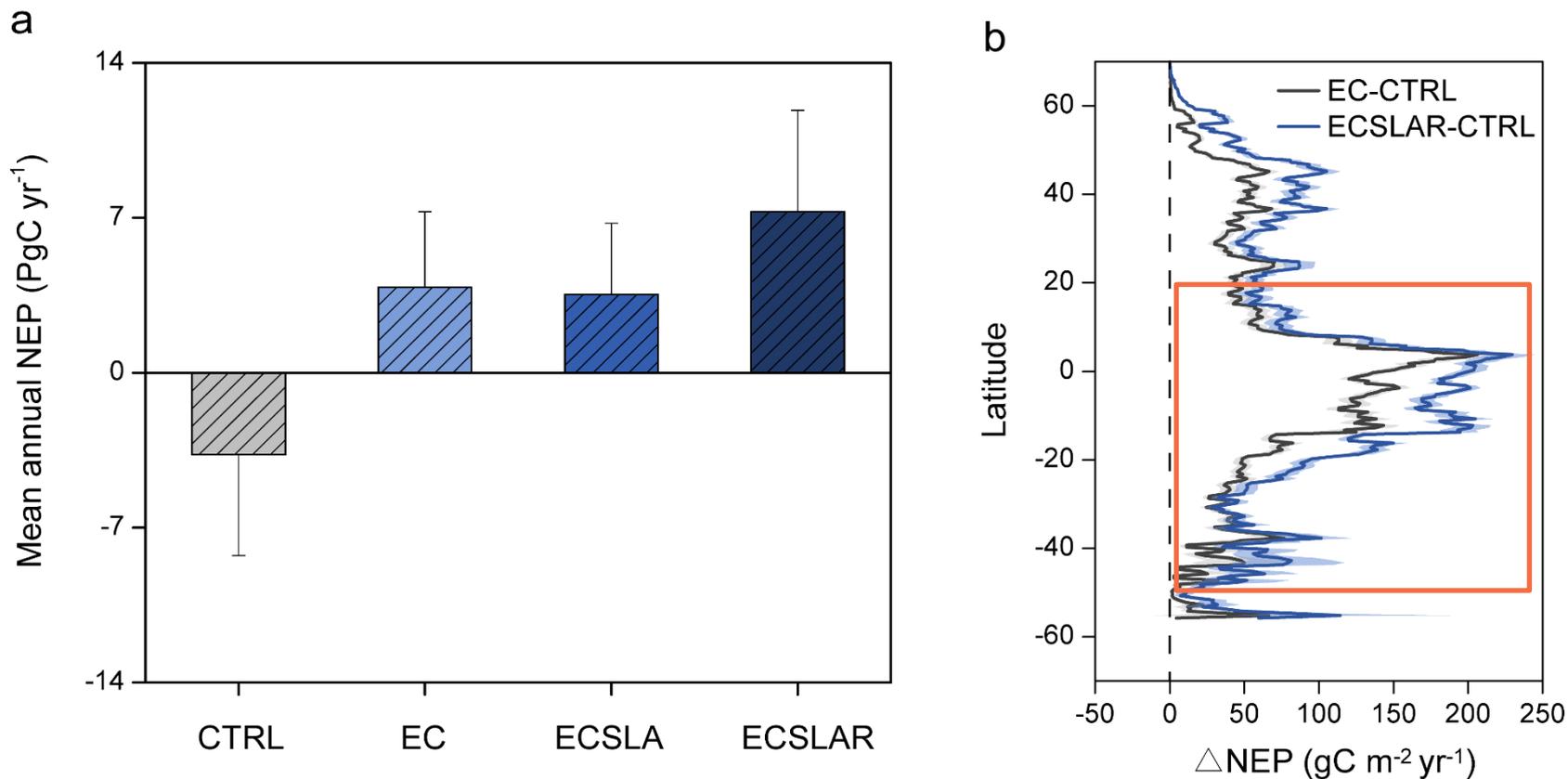


# 生物地球物理过程：能量交换的变化

SLA的适应性导致叶面积指数下降，可能会减小地表反射，引起地表物理增温；  
考虑了 $N_a$ -SLA关系的变化，则不显著影响叶面积指数



# 植物功能性状变化增强了高浓度CO<sub>2</sub>下陆地碳吸

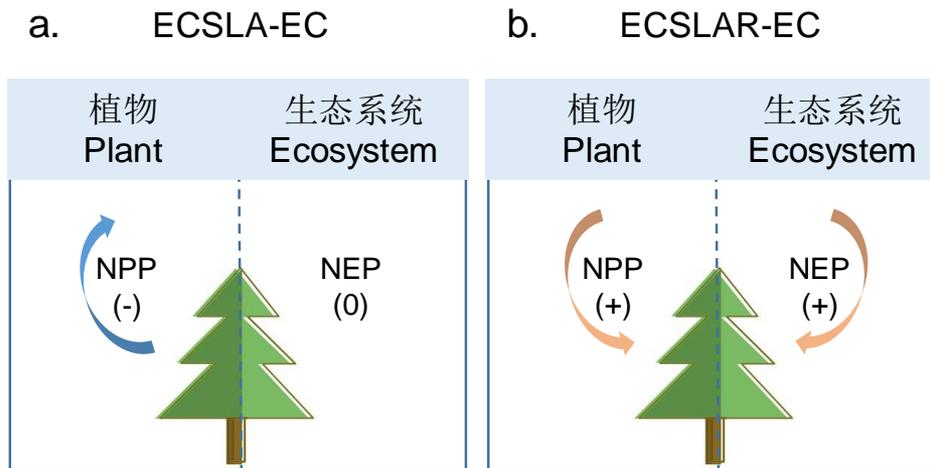


- SLA的变化对生态系统净碳交换没有显著影响
- N<sub>a</sub>-SLA关系的变化显著增强了陆地生态系统的碳汇能力，且由此引起的额外碳吸收主要集中在南半球的低纬度地区

# 小结：植物功能性状可塑性对生态系统功能模拟的影响

## □ 主要发现：

- 环境变化下植物功能性状的种内变异明显，但物种间叶片功能性状权衡关维持（异速指数）稳定
- 植物功能性状的可塑性，会通过生物地球化学循环和生物地球物理过程影响植物生长和生态系统功能

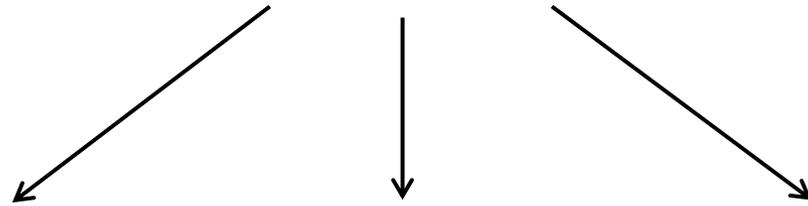


## □ 科学意义：

- 基于植物功能性状的模拟，揭示了在预测未来生态系统功能中考虑植物功能性状可塑性的重要性

# 科学问题

科学挑战：基于植物性状能否改进生态系统功能预测的不确定性？



问题 1.

植物功能性状对功能模拟的不确定性是否有贡献？

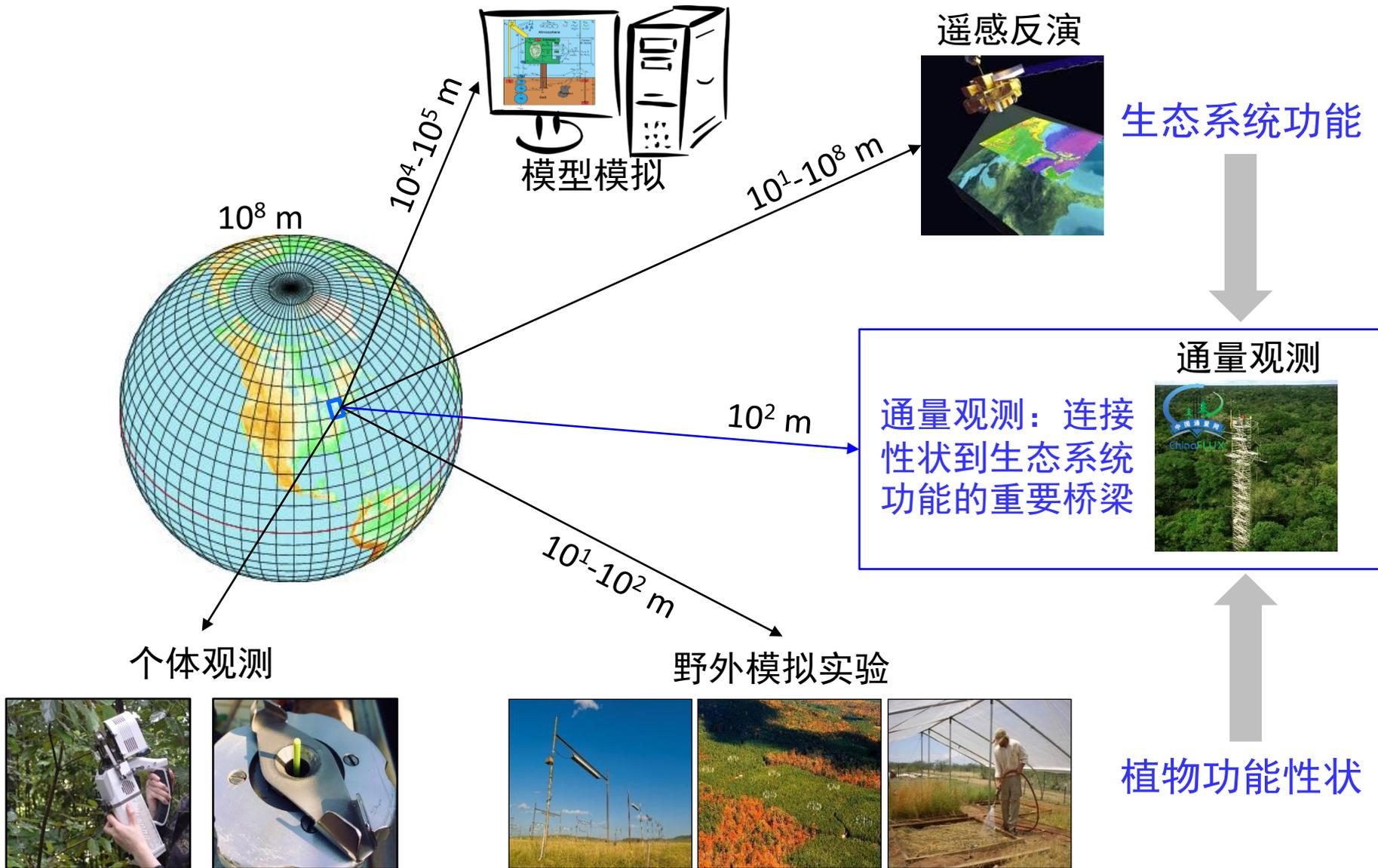
问题 2.

基于植物功能性状预测生态系统功能是否可行？

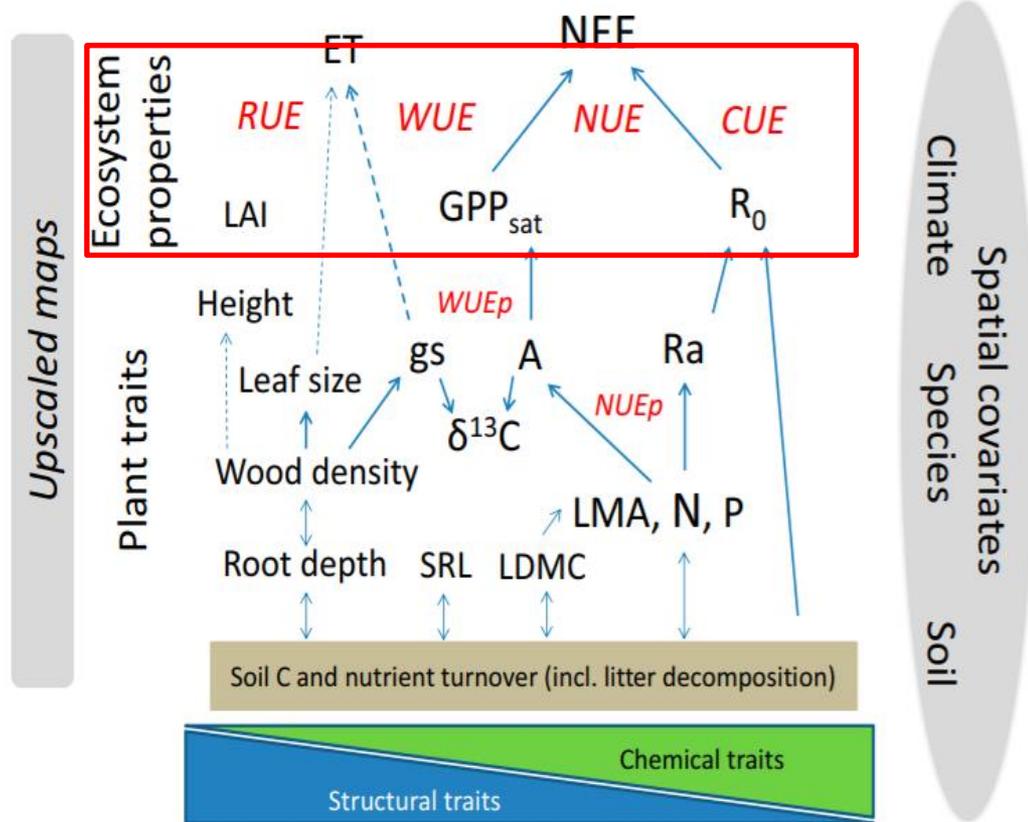
问题 3.

如何基于通量观测连接个体性状与生态系统功能？

# 问题3 如何基于通量观测连接个体性状与生态系统功能？



# 通量观测获取生态系统特征指数：性状—生态系统功能



生态系统（格点）尺度  
(e.g. NEP、GPP、RE)

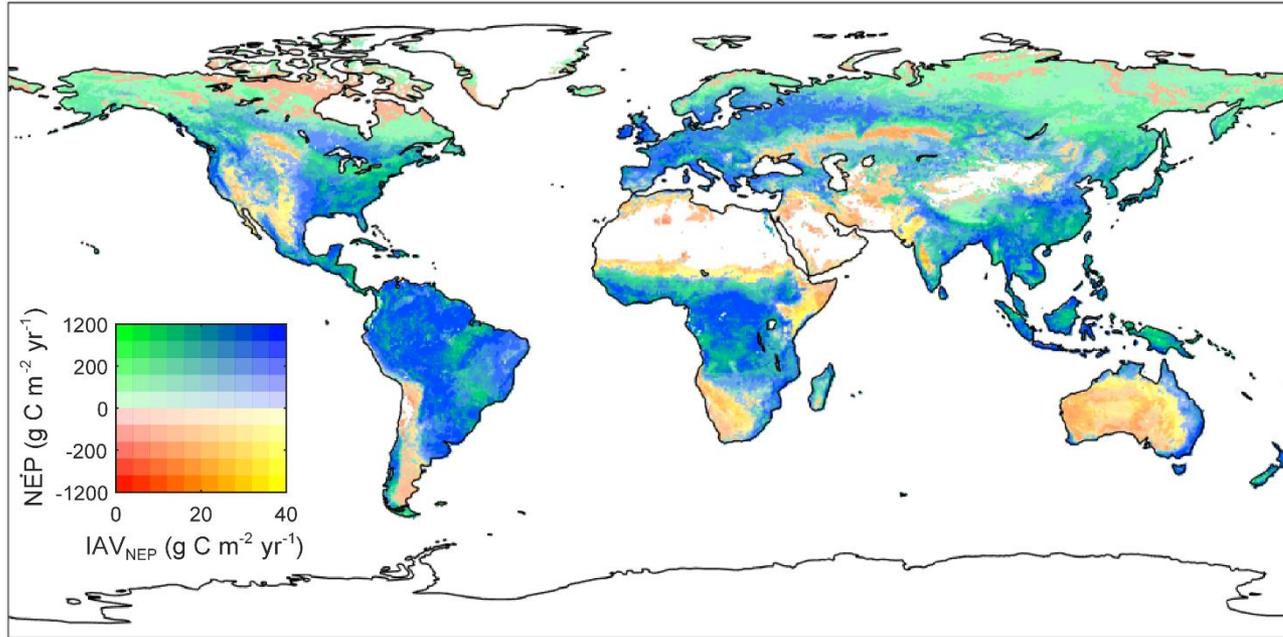
生态系统特征指数  
(e.g. CUE、WUE、  
biomass allocation、LAI)



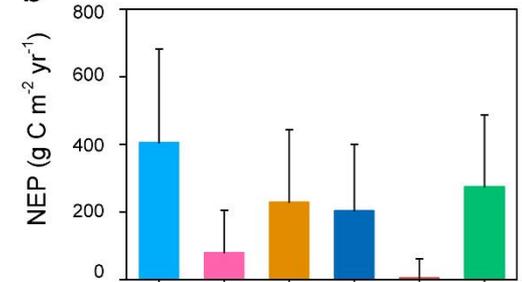
个体（器官）尺度  
(e.g. SLA、leaf nitrogen、  
leaf life-span、WD)

# 研究案例: 净生态系统生产力的时空变异特征及其指数

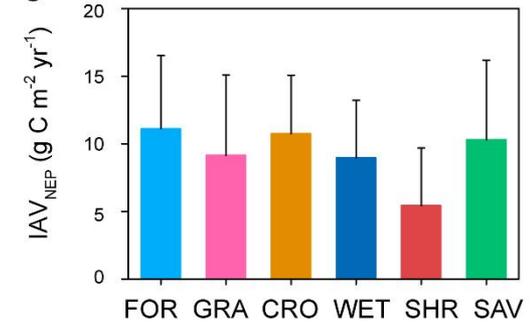
a FLUXCOM



b



c



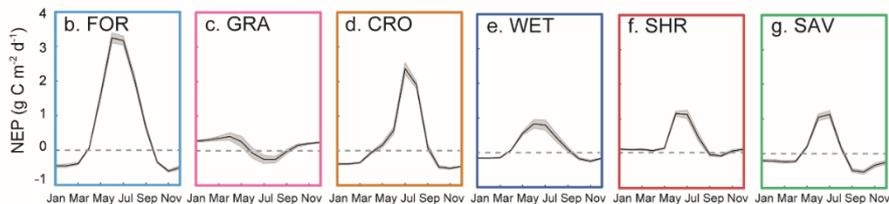
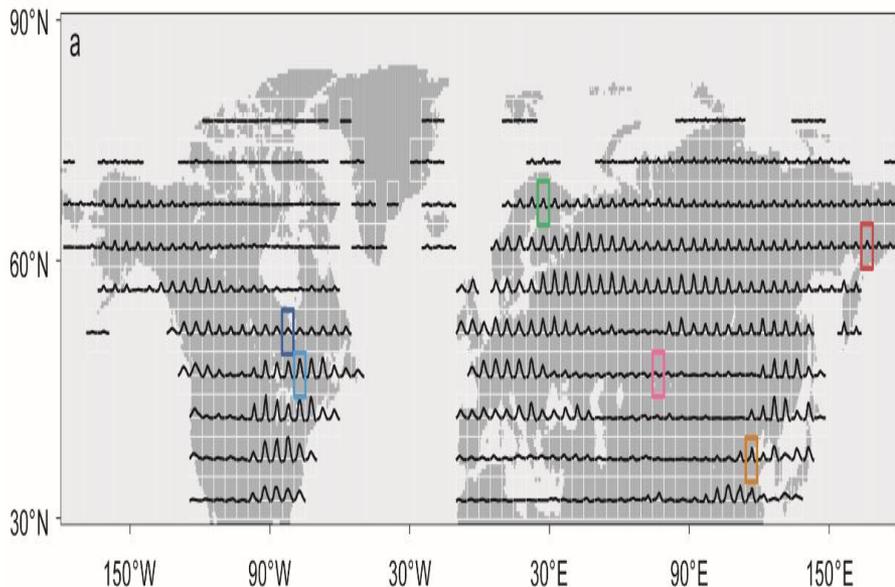
NEP: 表征生态系统的碳交换强度

IAV<sub>NEP</sub>: 表征生态系统碳交换的稳定性

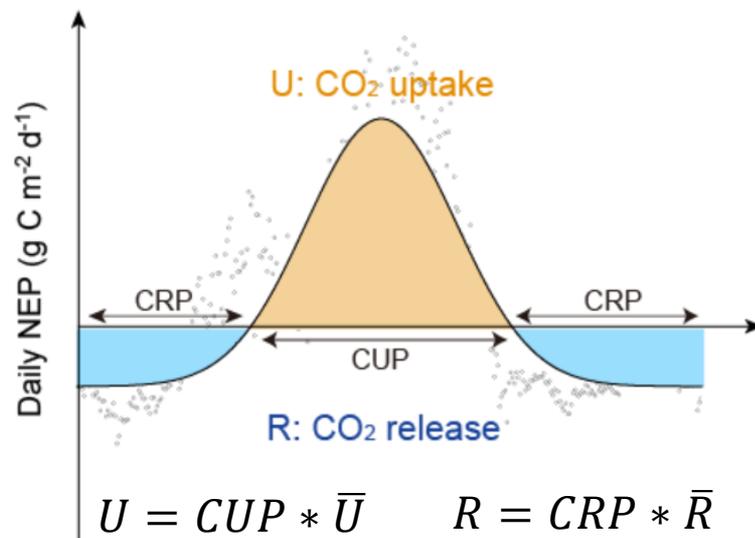
准确捕捉NEP和IAV<sub>NEP</sub>的空间分布特征是确定  
稳定生态系统碳汇区域的重要前提

# 基于净生态系统生产力动态变化特征构建分解框架

NEP的日均变化可以通过  
倒U曲线刻画



NEP分解框架



CUP: 碳吸收期长度      CRP: 碳释放期长度

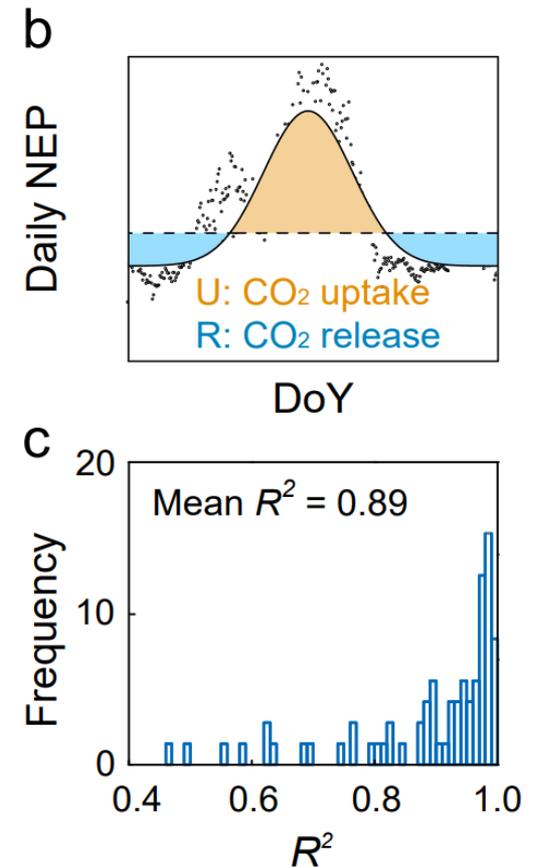
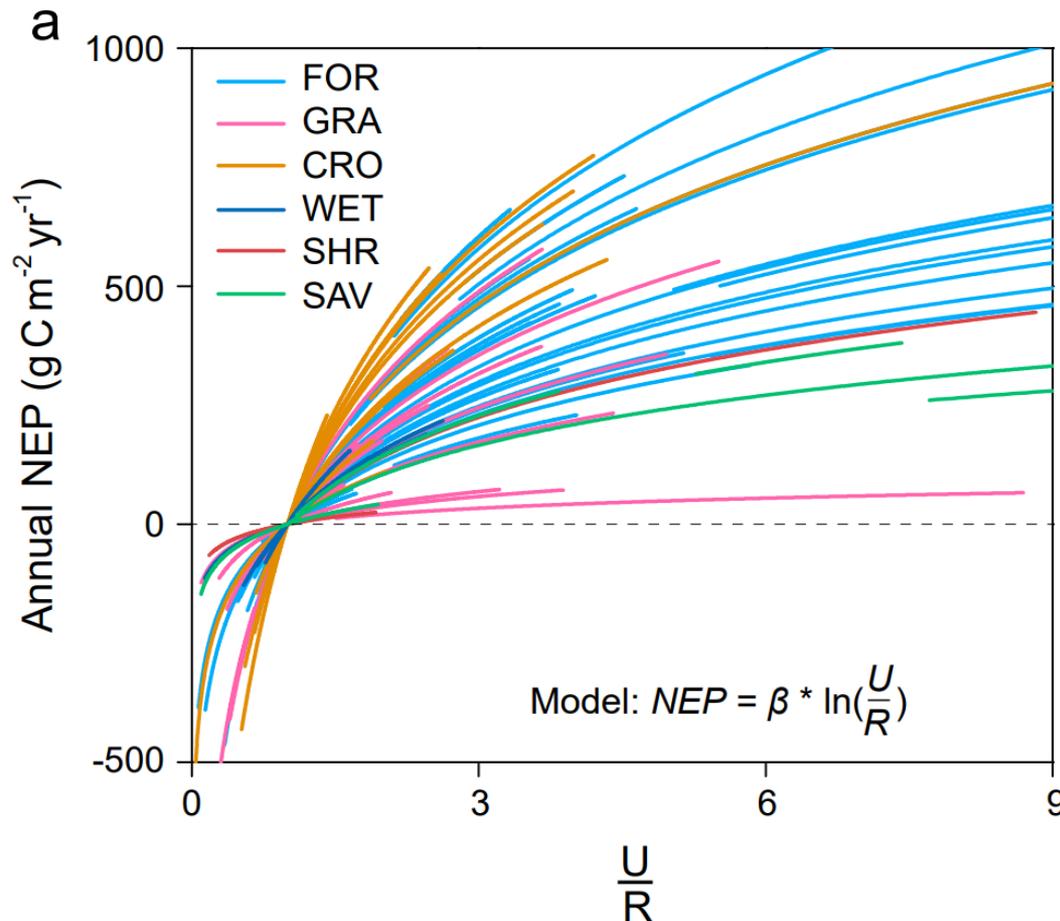
$\bar{U}$ : 日均吸收速率       $\bar{R}$ : 日均释放速率

U: 吸收量      R: 释放量

$$NEP = \int (U, R)$$

# 基于通量观测确定净生态系统生产力的特征指数

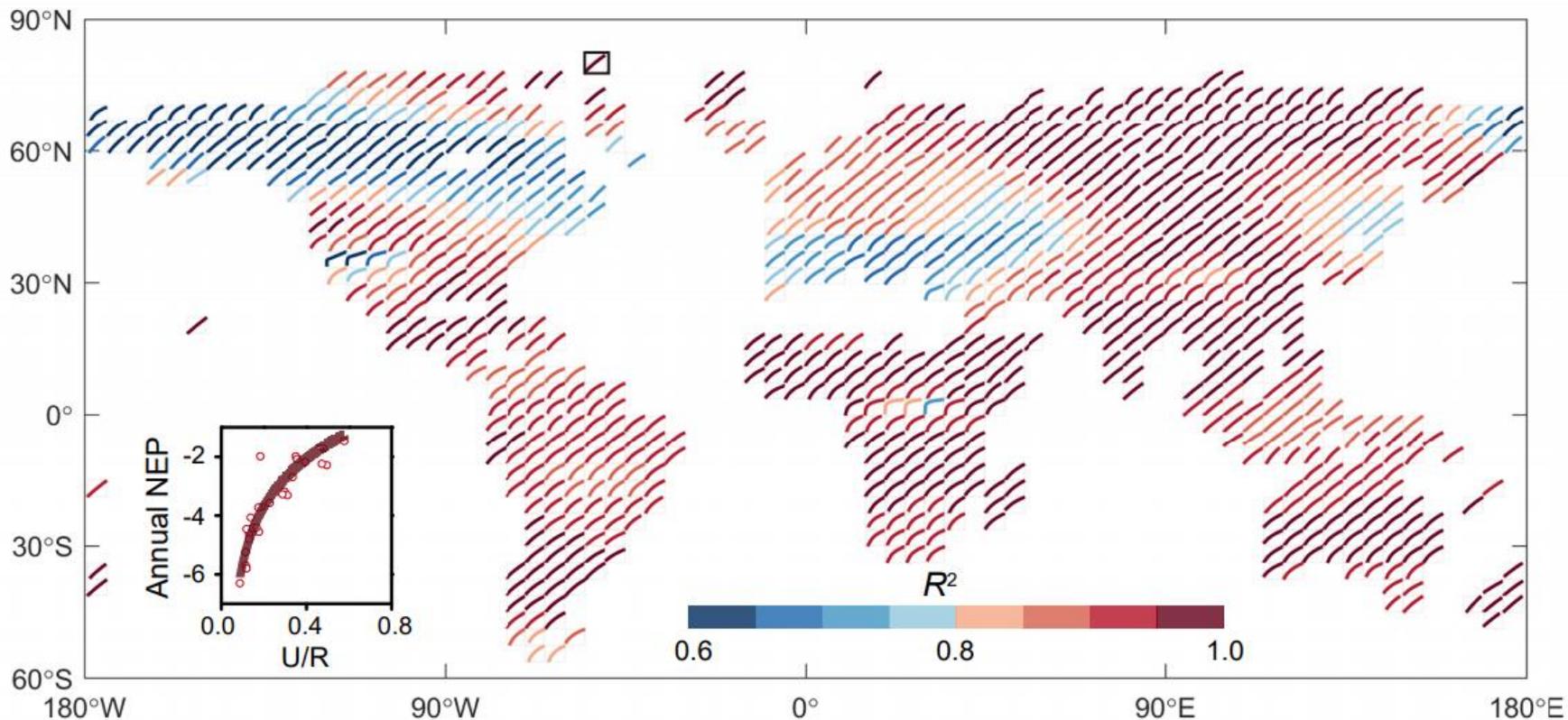
FLUXNET 2015 (72 sites)



$$NEP = \int (\beta, \frac{U}{R})$$

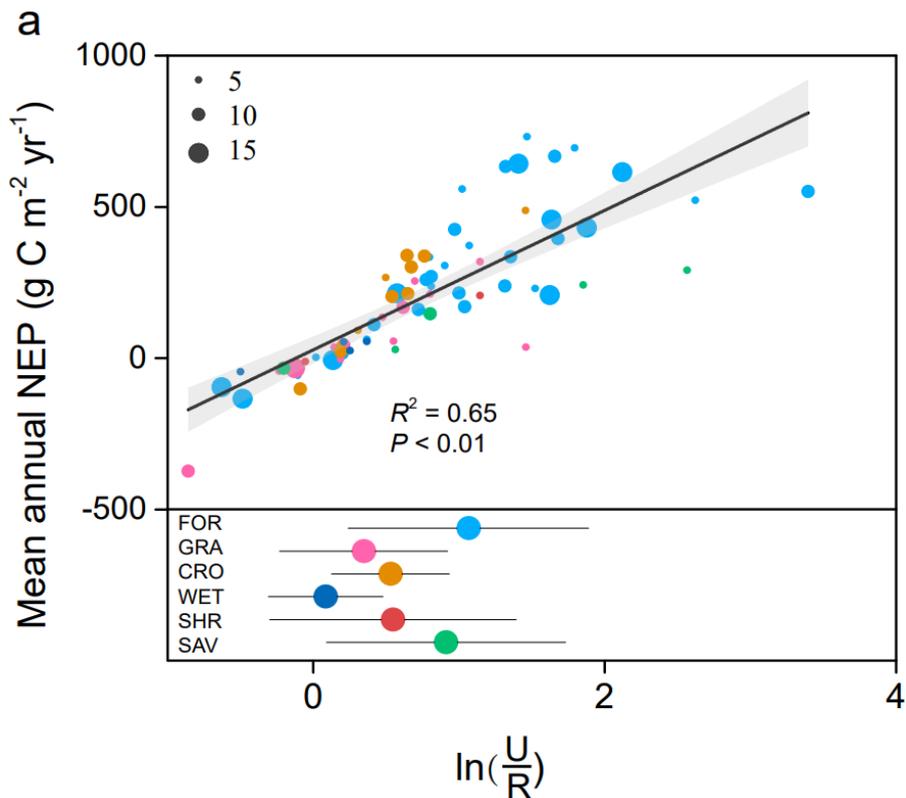
# 大气反演产品呈现出相似的特征指标

Jena CarboScope inversion product

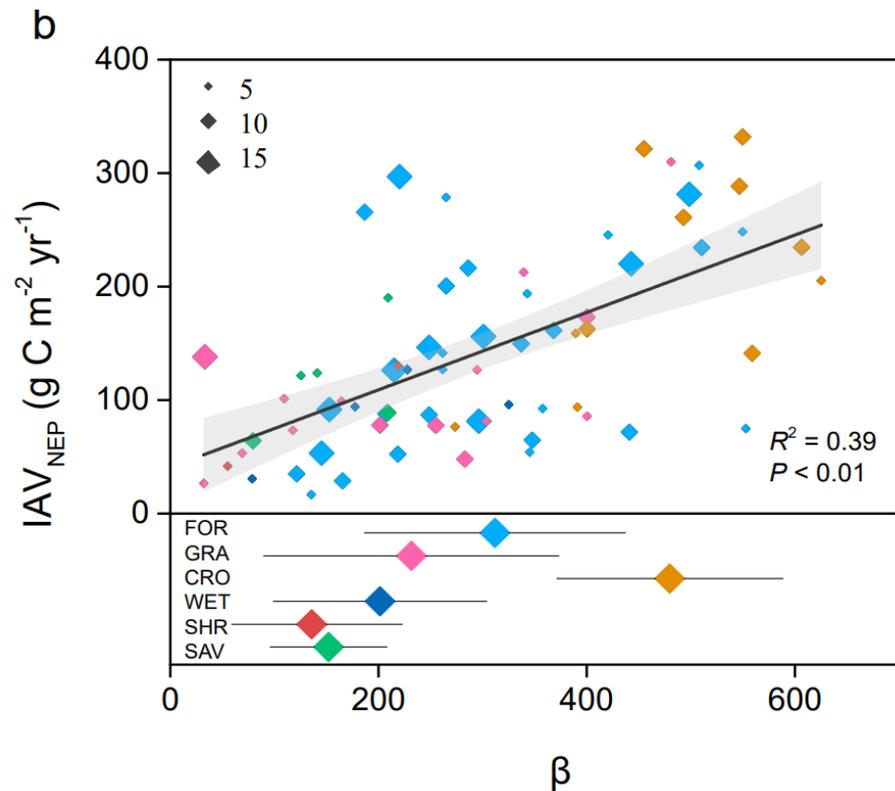


$$NEP = \beta * \ln\left(\frac{U}{R}\right) \quad (0.6 < R^2 < 1)$$

# NEP和IAV<sub>NEP</sub>的空间分布受不同的指数调控



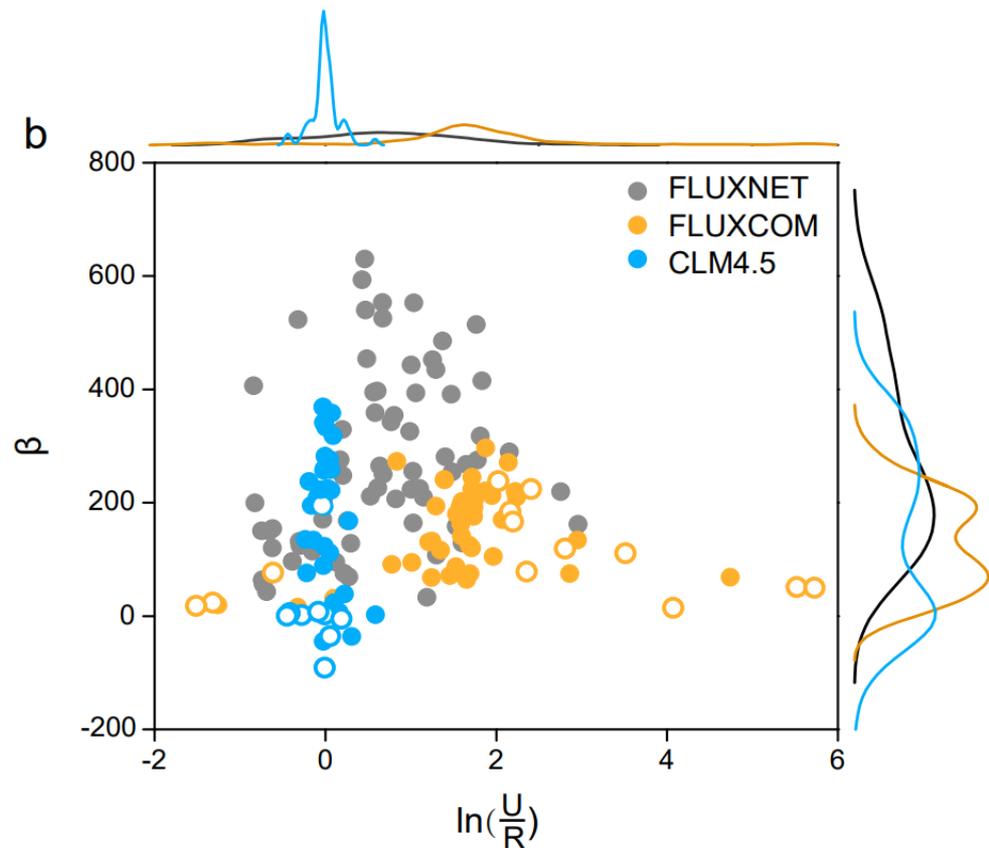
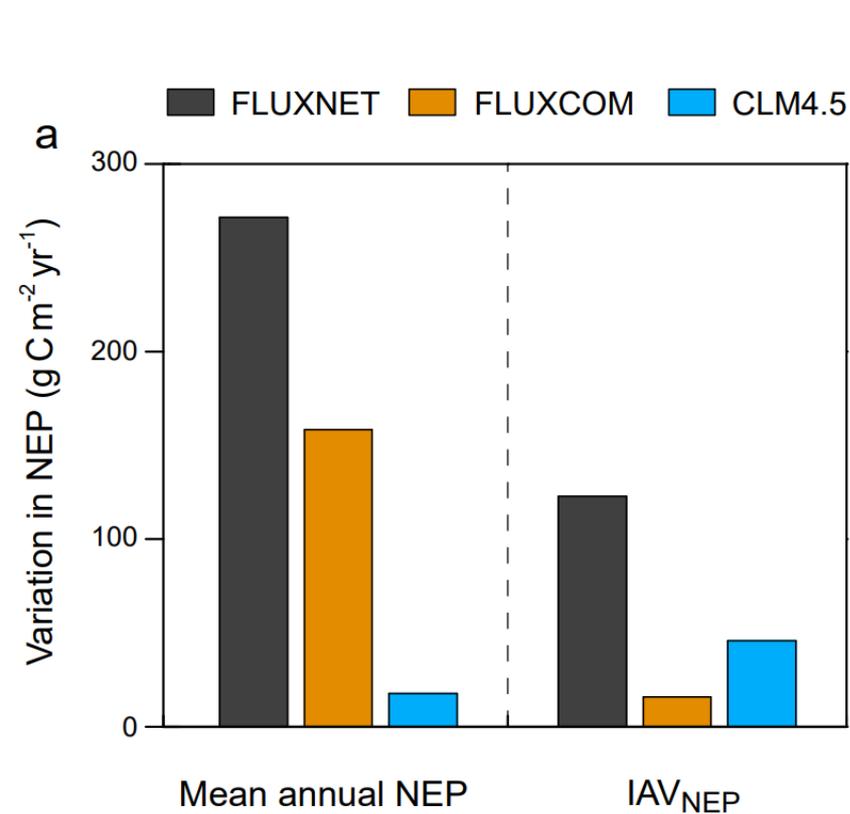
$\frac{U}{R}$  指示了生态系统的碳交换强度



$\beta$  指示了生态系统碳交换的稳定性

# 生态系统特征指数：模型基准分析

基于通量观测获得的生态系统特征指数还是进行模型基准性分析的重要基础，可以对模型模拟过程进行约束和限制



# 对不同生态系统特征指数的机理性理解

$$NEP = \int (\beta, \frac{U}{R})$$

环境因子调控

生物因子调控

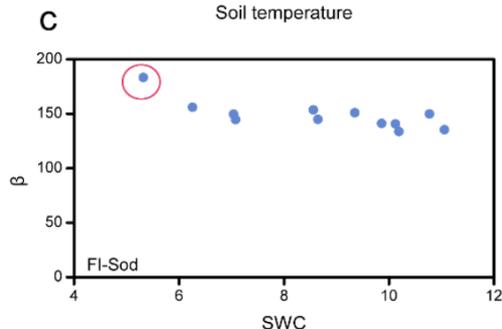
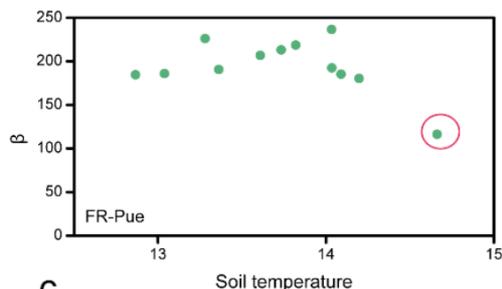
$$\frac{U}{R} = \int (\frac{\bar{U}}{\bar{R}}, \frac{CUP}{CRP})$$

生理调控

物候调控

植物性状：光合速率、呼吸速率、  
叶片寿命、叶物候...

微生物性状：酶活性、碳利用效率  
率...



在站点尺度上， $\beta$ 比较稳定，  
主要受到环境限制因子的影响

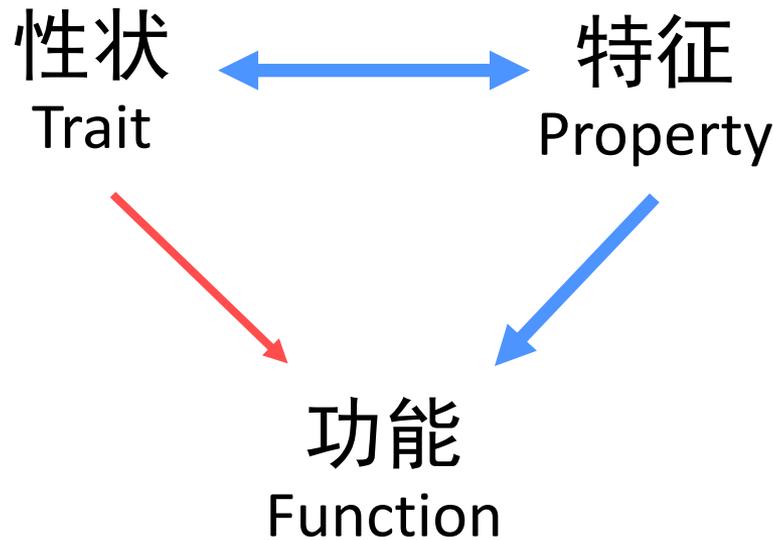
# 小结：植物功能性状研究需更多关注与通量特征的联系

- 净生态系统生产力的时空变异性可以通过一组特征指数来解析
- 性状与生态系统特征间关系的解析有望改进生态系统功能的预测



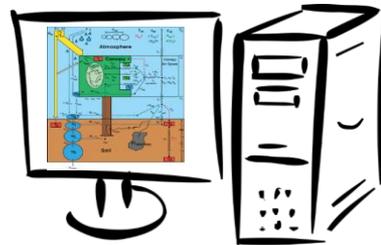
## 植物功能性状

Leaf area index  
Specific leaf area  
Specific root length  
Plant height  
Wood density  
Leaf mass content  
Seed mass  
Crown size  
Vcmax  
... ..



## 生态系统通量

CO<sub>2</sub> fluxes  
H<sub>2</sub>O fluxes  
Energy balance  
... ..



## 数值模型

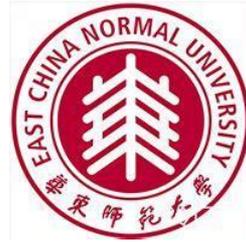
Ecosystem productivity  
Carbon storage dynamics  
Land carbon sink  
Biophysical feedbacks to climate change  
... ..

# 总结

植物功能性状对理解和降低功能预测的不确定性具有重要的意义

1. 植物功能性状是陆地碳循环模型不确定性的重要来源。
2. 植物功能性状在物种之间的协变关系在全球环境变化下具有较高的稳定性。
3. 植物功能性状的可塑性，会通过生物地球化学循环和生物地球物理过程影响植物生长和生态系统功能。
4. 通量观测网络的发展和完善将为基于植物功能性状预测生态系统功能提供重要机遇。

# 致谢



- 中国通量观测研究联盟
- 浙江天童国家站
- 华东师范大学
- 研究团队



感谢各位老师和同学，敬请批评指正！