



土壤水分变化主导了近三十年陆地生态 系统呼吸的下降趋势

周旭辉, 李楠

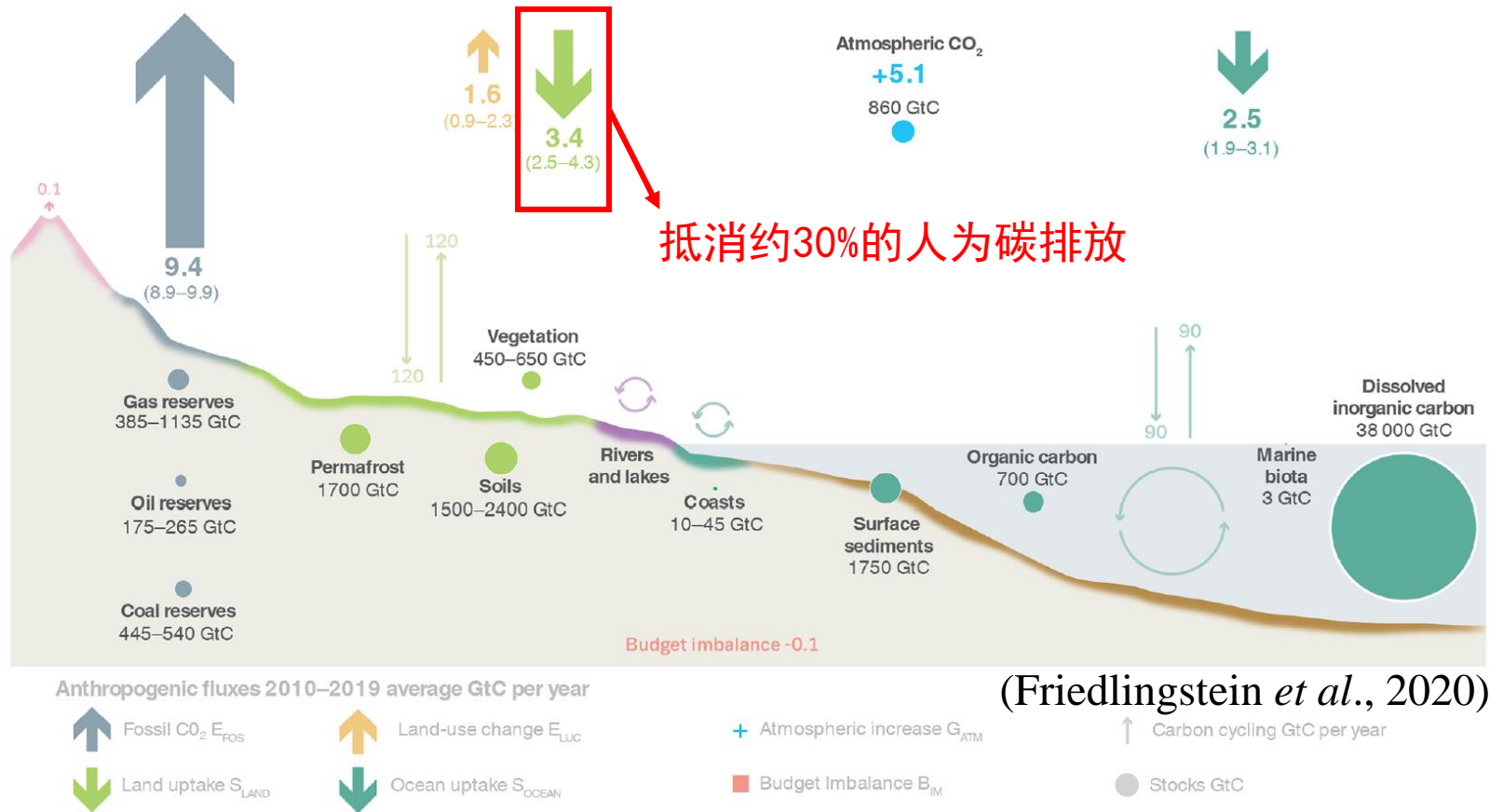
华东师范大学生态与环境科学学院

东北林业大学林学院

2021-8-19

全球碳收支

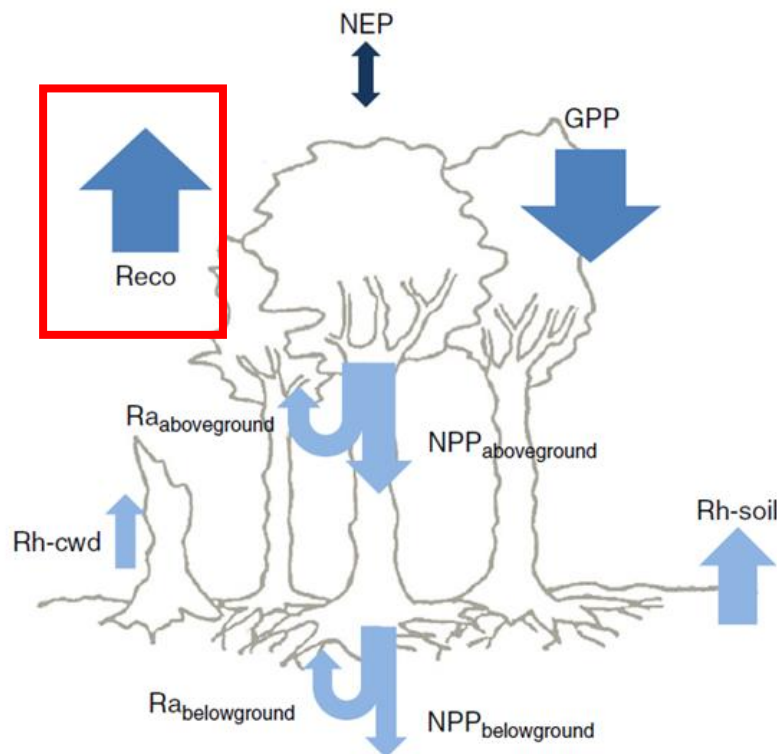
The global carbon cycle



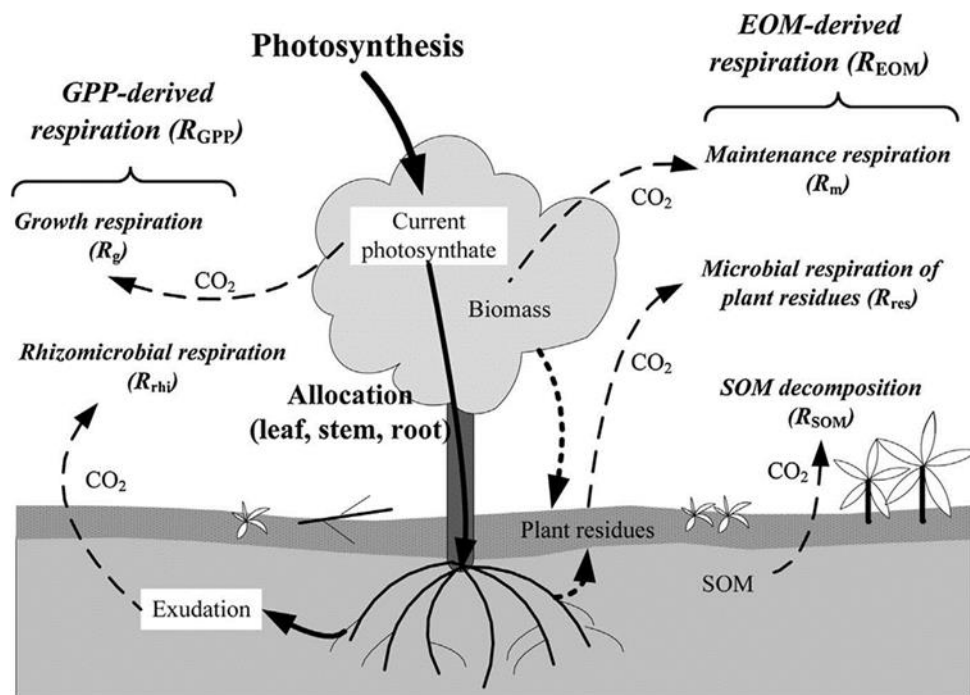
➤ 陆地生态系统碳通量的微小变化会对大气CO₂浓度产生重大影响

陆地生态系统呼吸

$$NEP = GPP - ER$$



(Campioli *et al.*, 2016)

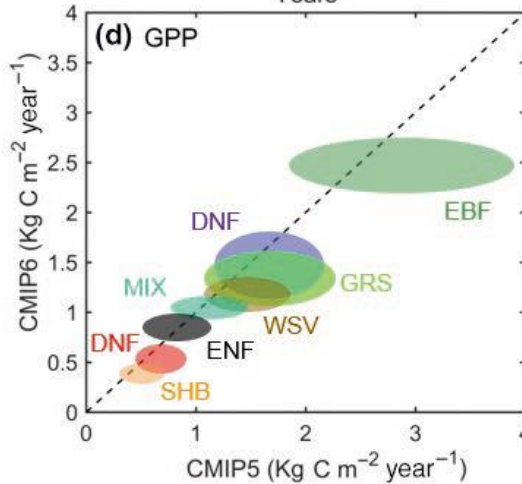
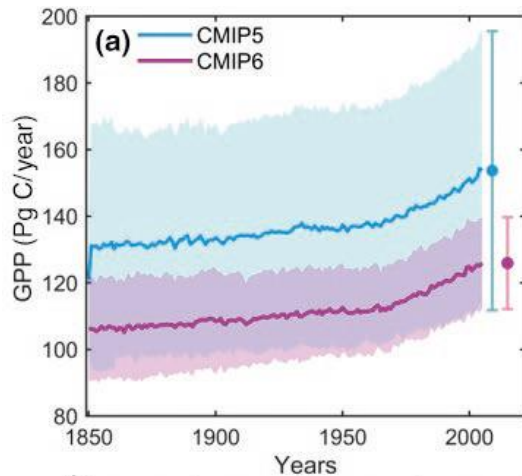


(Gao *et al.*, 2015)

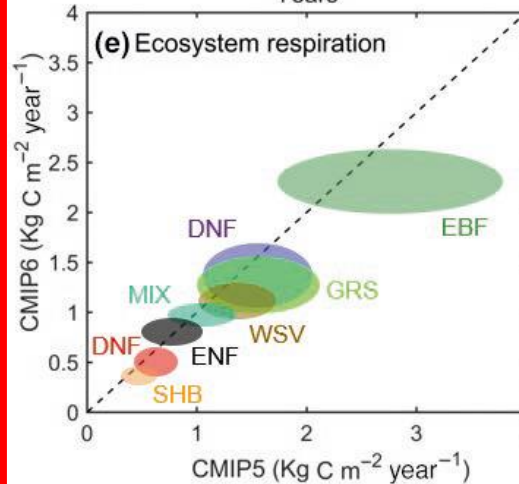
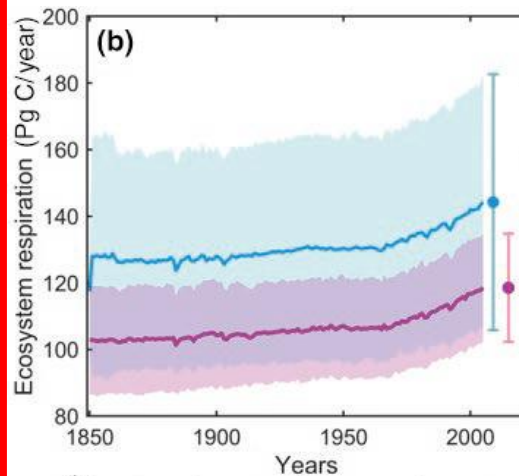
- 生态系统呼吸 (ER) 在量化全球碳平衡方面起着重要作用
- ER不同组成成分存在不同的机制，且影响因素也不同

模型模拟陆地生态系统CO₂通量不确定性很大

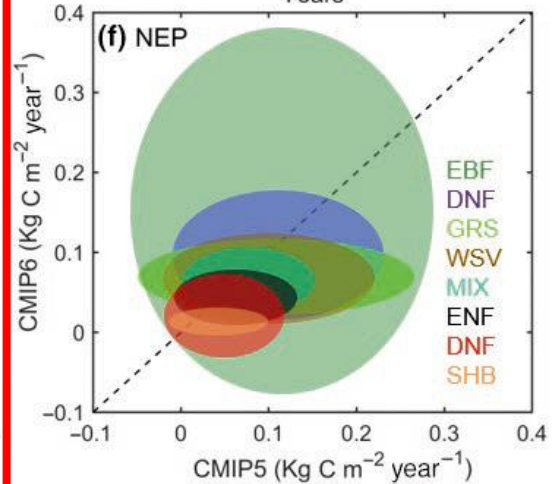
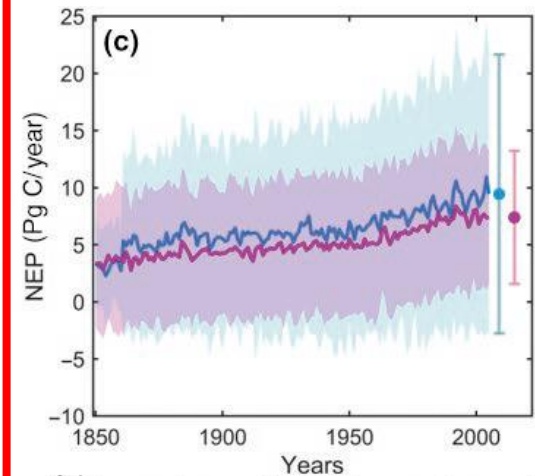
总初级生产力GPP



生态系统呼吸ER



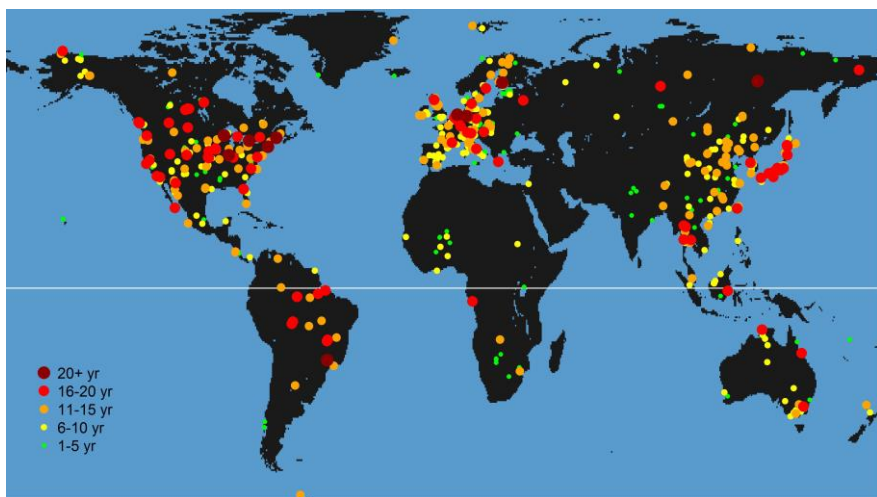
净生态系统生产力NEP



(Xia *et al.*, 2020)

涡度协方差法——CO₂通量拆分

CO₂通量拆分： $NEE = -NEP = ER - GPP$



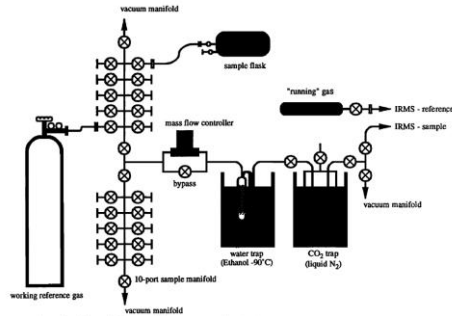
- 涡度协方差法利用微气象学原理研究陆地生态系统碳、水、能量通量，是最流行的方法之一

涡度协方差法的优势和局限

优势	局限
直接测量 (e.g. NEE)	低湍流混合产生系统误差
空间范围较大km	复杂地形误差
时间分辨率高、跨度大	能量平衡不闭合
生态系统扰动小	拆分ER和GPP理论不完善
同时监测多种通量	不适用于更小尺度样地
方便扩展监测	不能提高更详细碳分配参数
人力成本低	微气象专业性强

稳定同位素技术的发展与应用

同位素比质谱仪(IRMS)

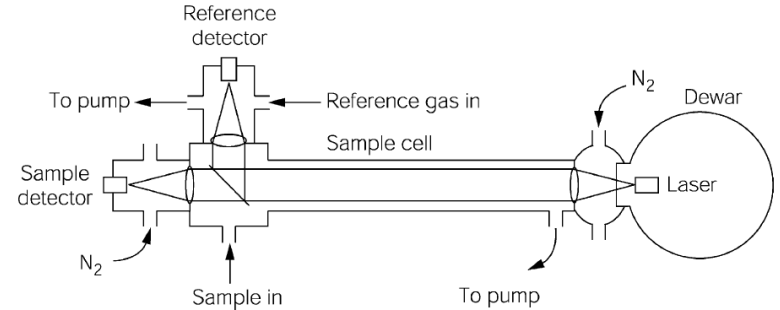


(Brand et al., 1996)

光学技术发展



可调二极管激光器(TDL)

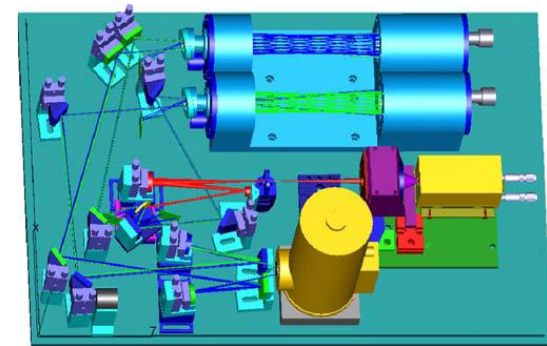


(Bowling et al., 2003)



(Wehr et al., 2013)

原位连续测定稳定同位素特征



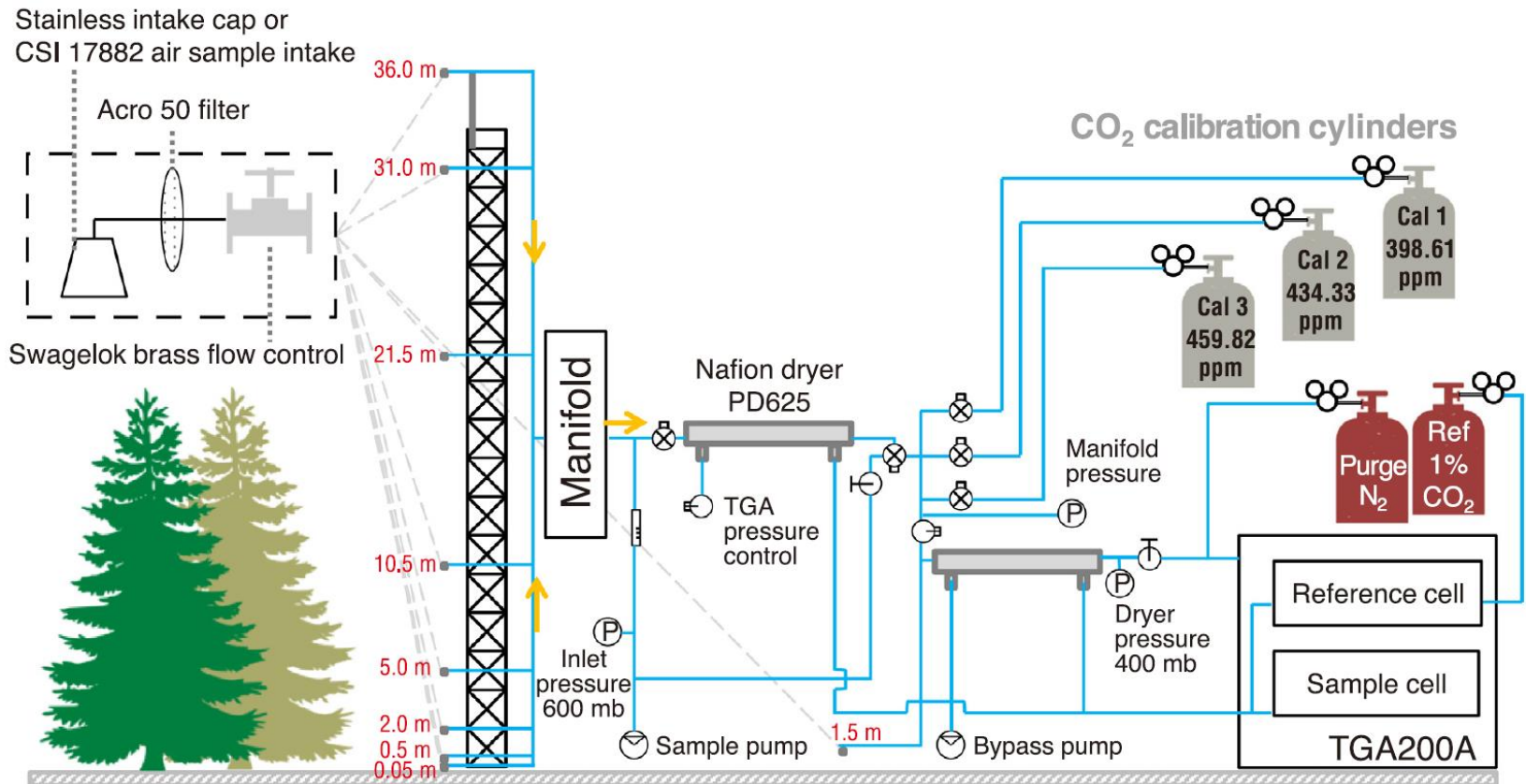
(Nelson et al., 2008)

改进版量子级联激光光谱仪(QCLS pro)

量子级联激光光谱仪(QCLS)

稳定同位素技术的发展与应用

稳定同位素采样系统示意图



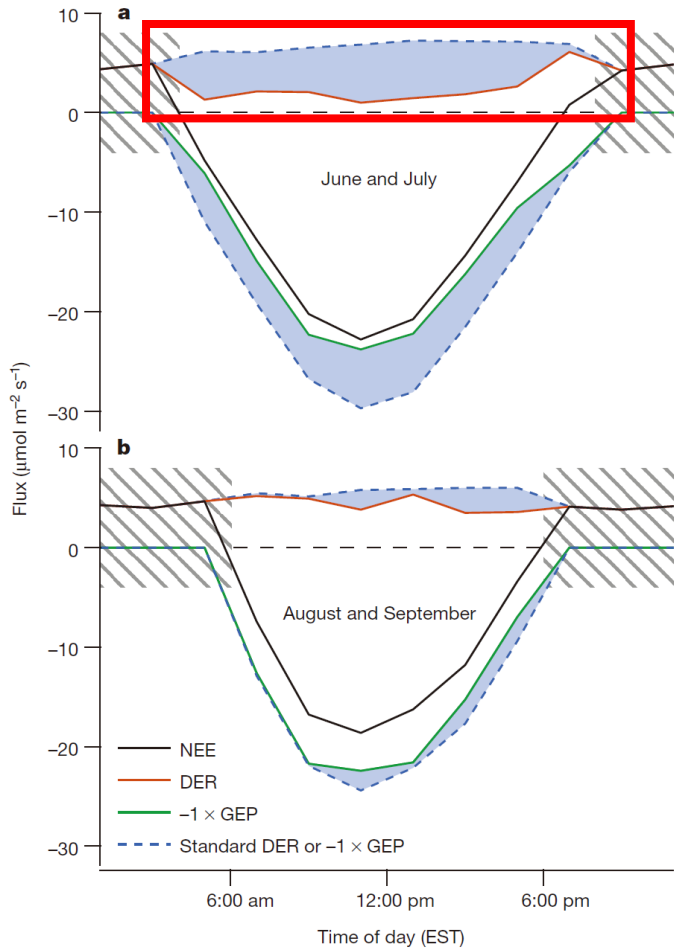
$$NEE = R_{eco} - GPP$$

$$\delta_N NEE = \delta_R R_{eco} - \delta_A GPP$$

(Lee *et al.*, 2020)

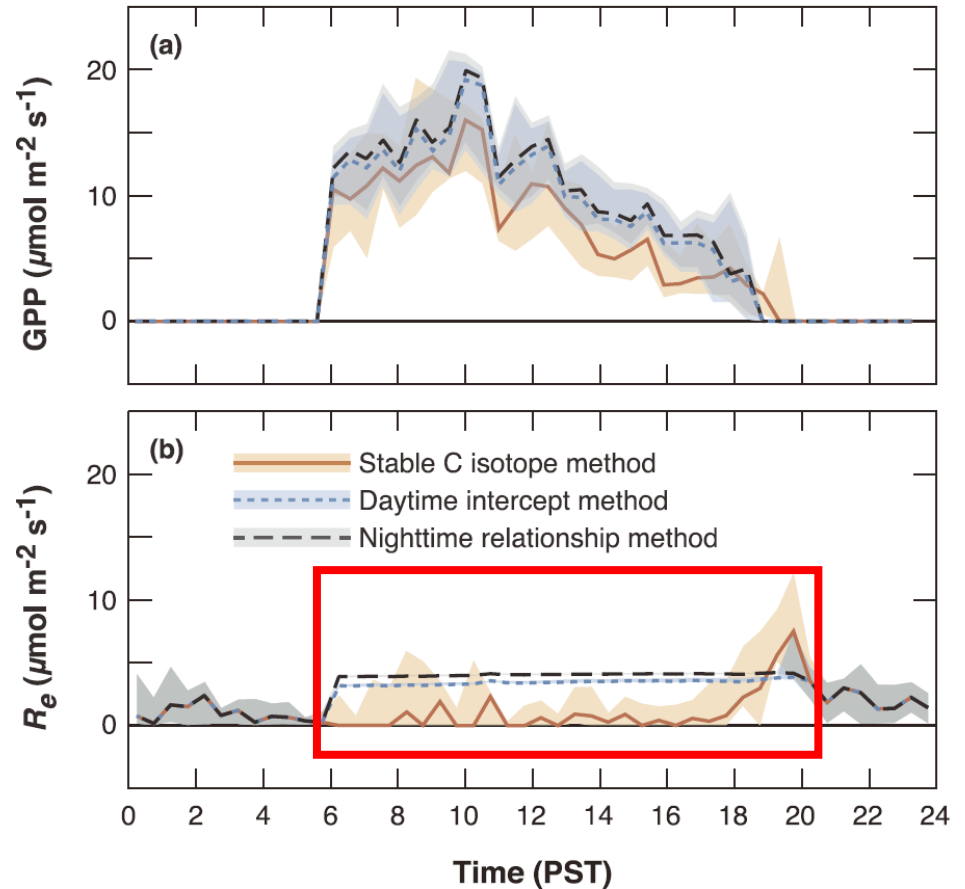
稳定同位素技术的发展与应用

Kok effect



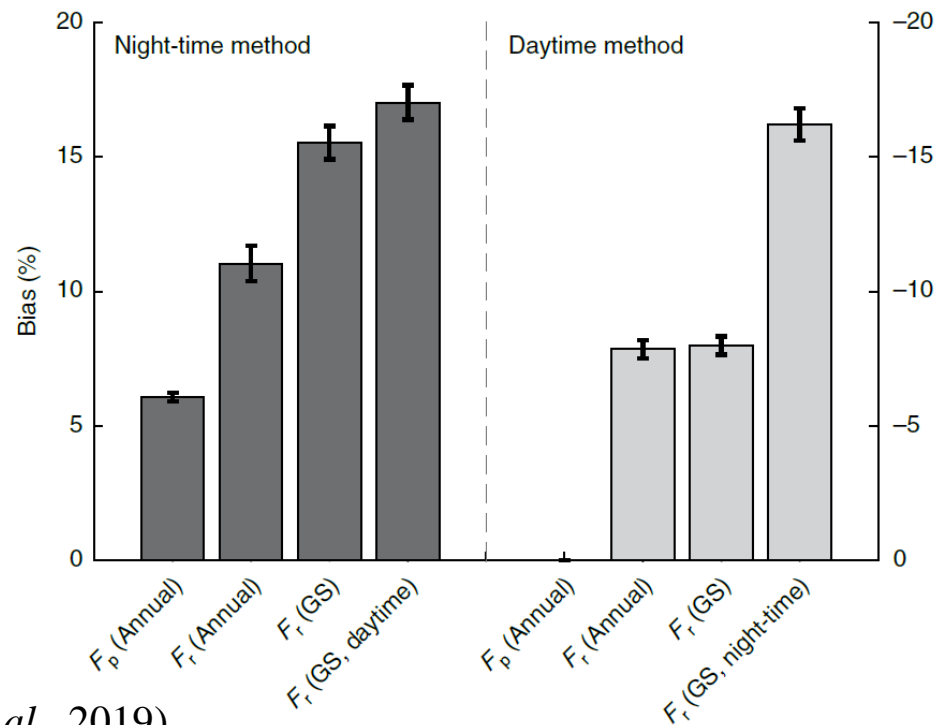
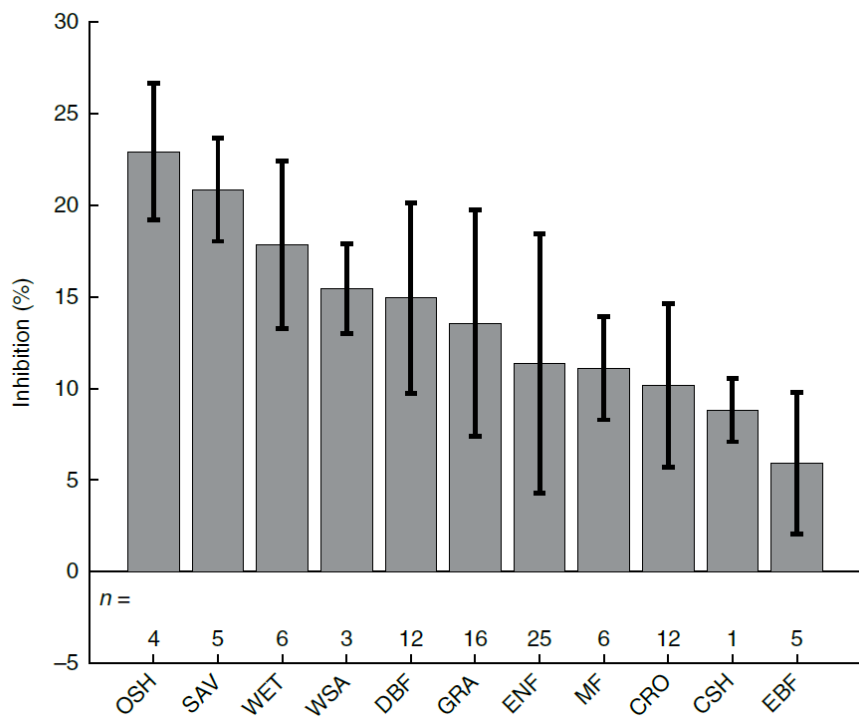
(Wehr *et al.*, 2016)

白天生态系统呼吸低于夜间



(Lee *et al.*, 2020)

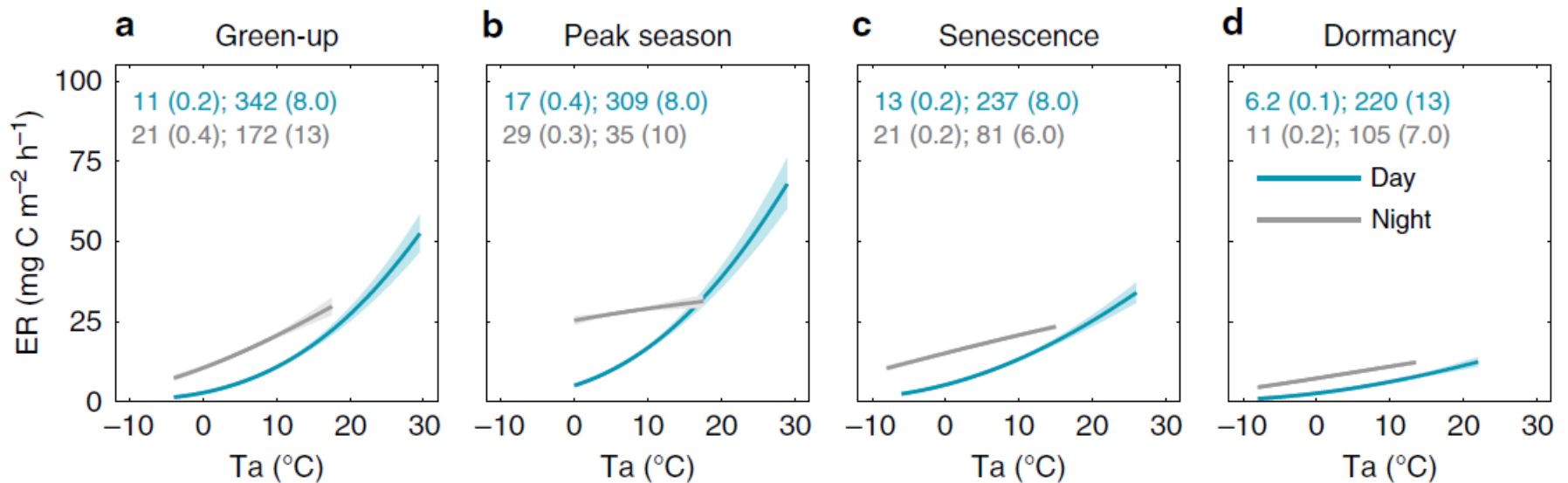
叶片呼吸的光抑制



(Keenan *et al.*, 2019)

- 白天生态系统呼吸的抑制性普遍存在于不同生态系统类型
- 若不考虑Kok effect, 生态系统呼吸的估算存在很大偏差

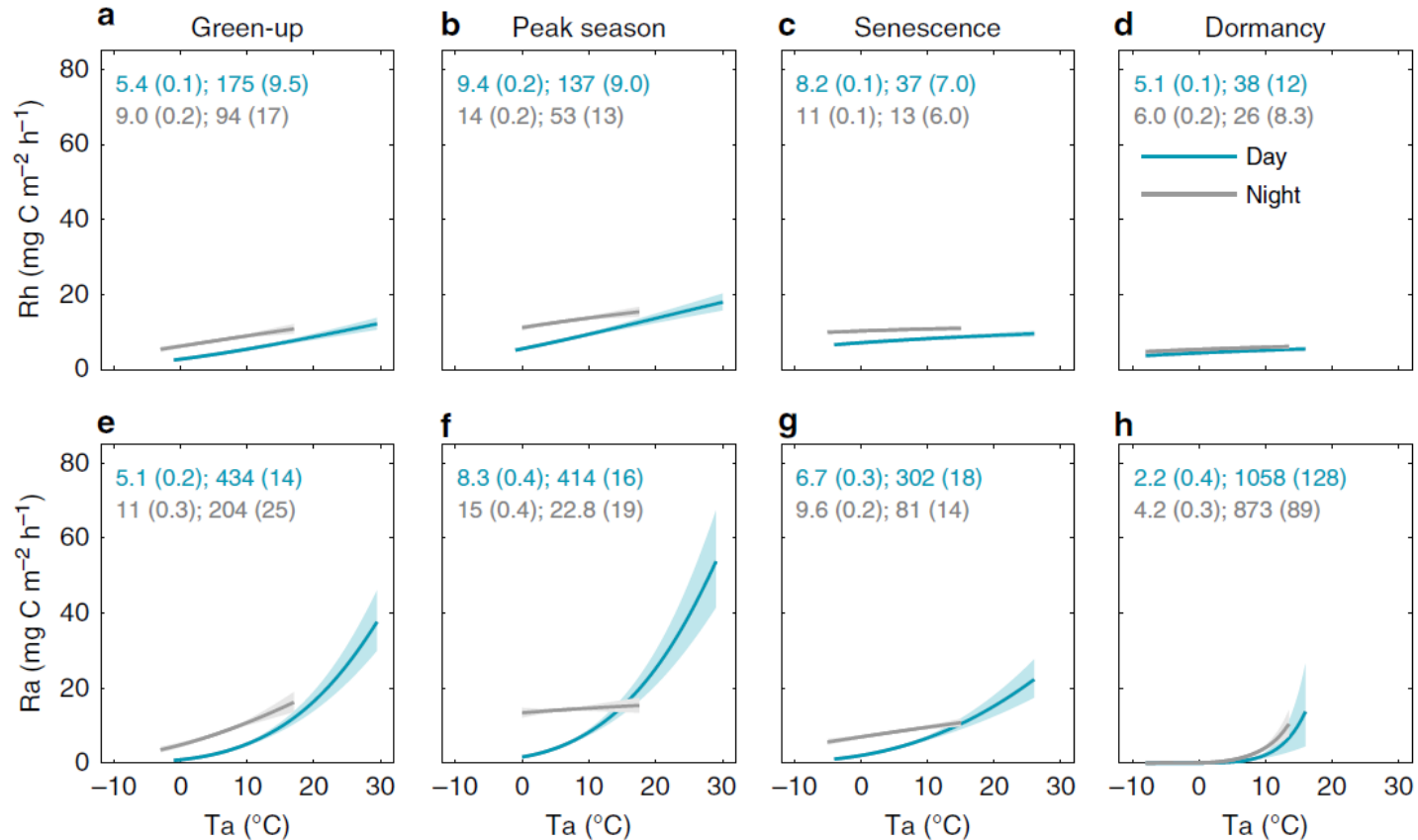
生态系统呼吸对温度的响应



(Järveoja *et al.*, 2020)

➤ 生态系统呼吸的温度敏感性存在昼夜差异

生态系统呼吸对温度的响应

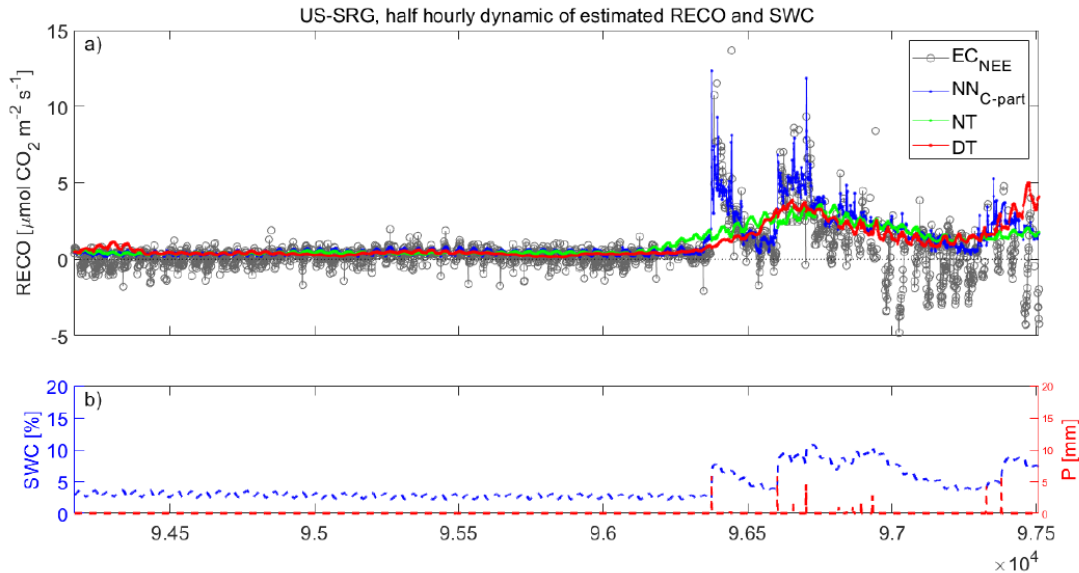


(Järveoja *et al.*, 2020)

➤ 自养和异养呼吸的温度敏感性均存在昼夜差异，但差异大小不同

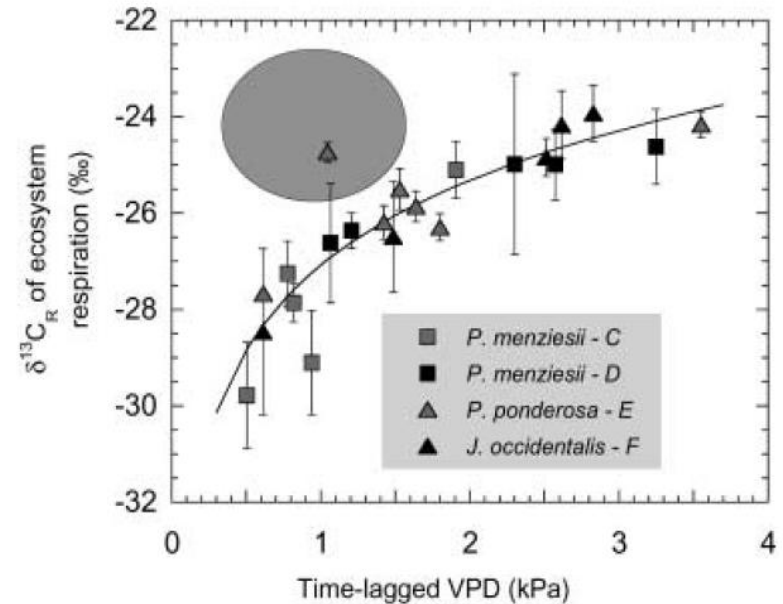
生态系统呼吸对水分的响应

降雨脉冲



(Tramontana *et al.*, 2020)

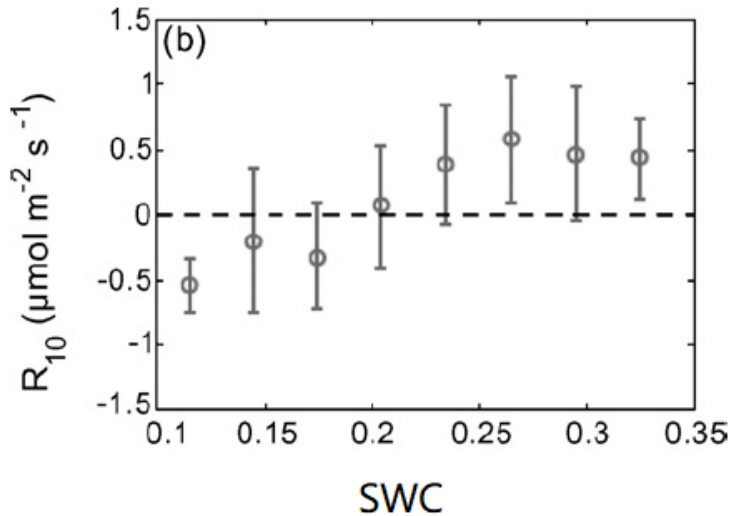
ER与VPD显著相关



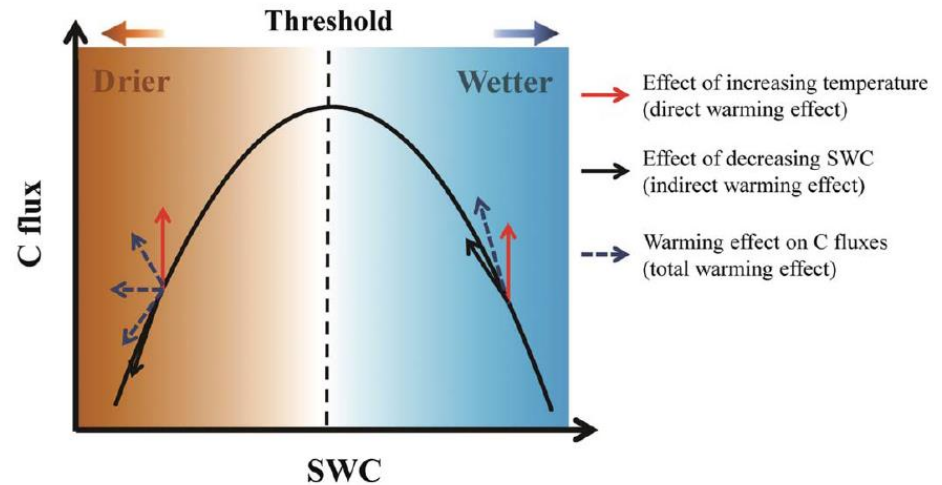
(Bowling *et al.*, 2002)

➤ (地上或地下) 水分条件的改变显著影响生态系统呼吸的变化

生态系统呼吸对水分的响应



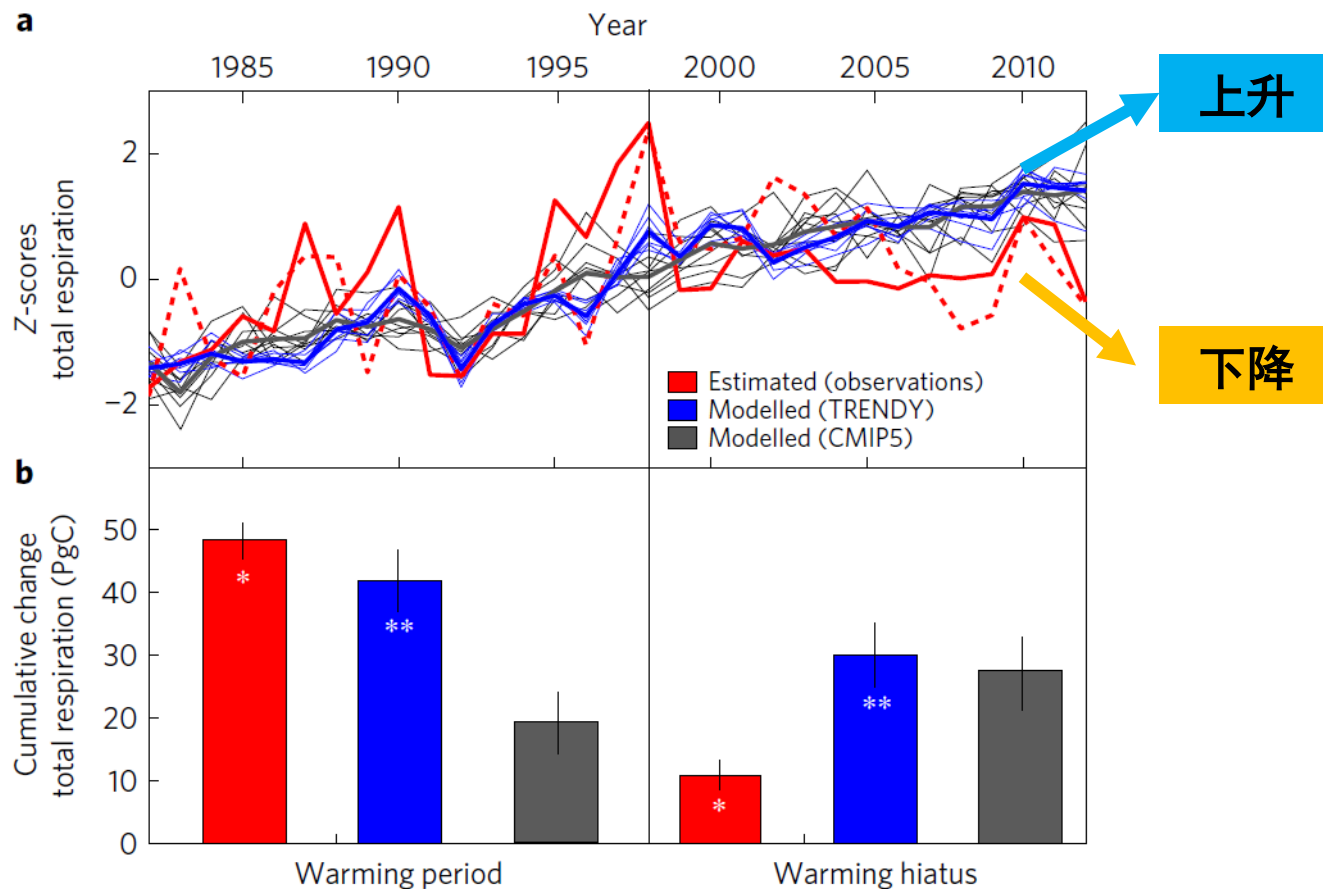
(Ricciuto *et al.*, 2008)



(Quan *et al.*, 2019)

- 生态系统呼吸对水分的响应可能由干燥环境下的正相关转变成湿润环境下的负相关

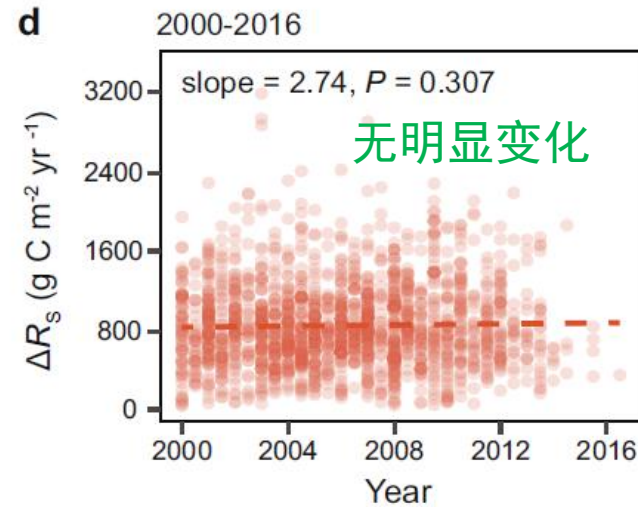
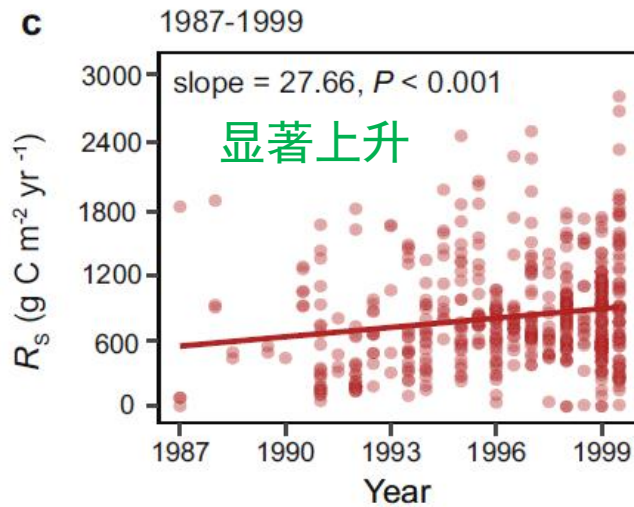
陆地生态系统呼吸的长期变化趋势



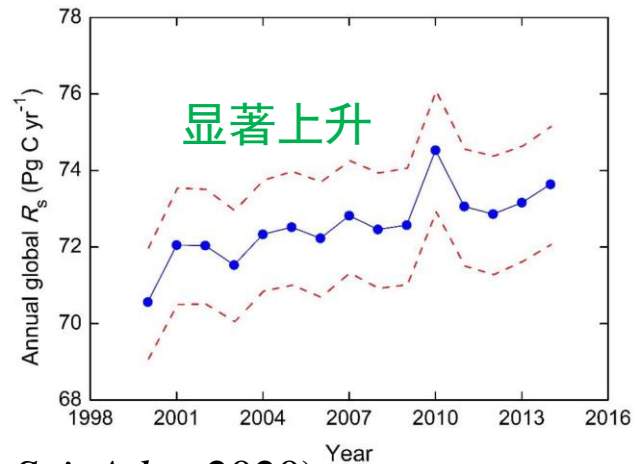
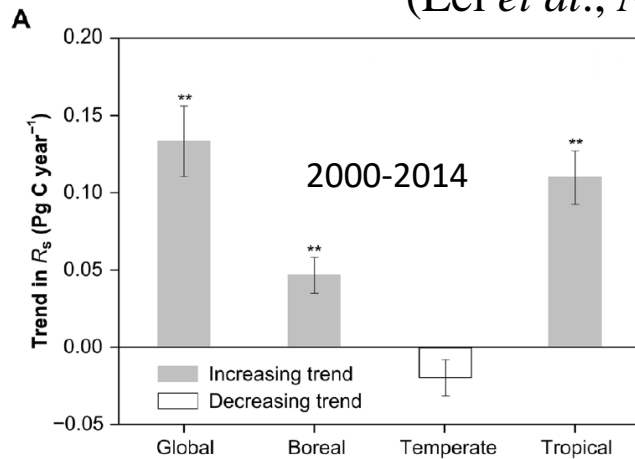
(Ballantyne *et al.*, *Nat. Clim. Change*, 2017)

生态系统呼吸(ER)长期变化趋势仍存在争议

生态系统呼吸主要组分（土壤呼吸）长期变化趋势



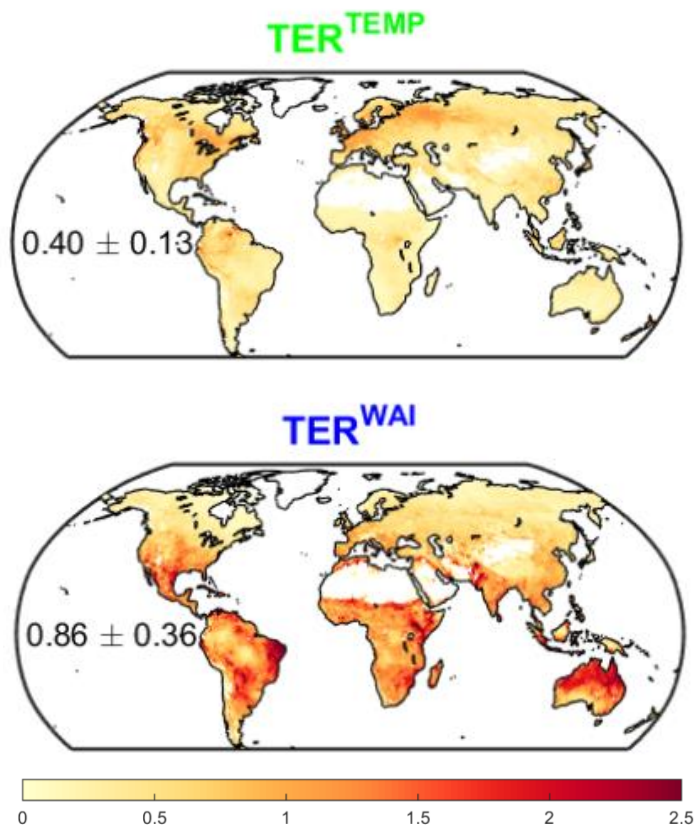
(Lei *et al.*, *Nat. Commun.*, 2021)



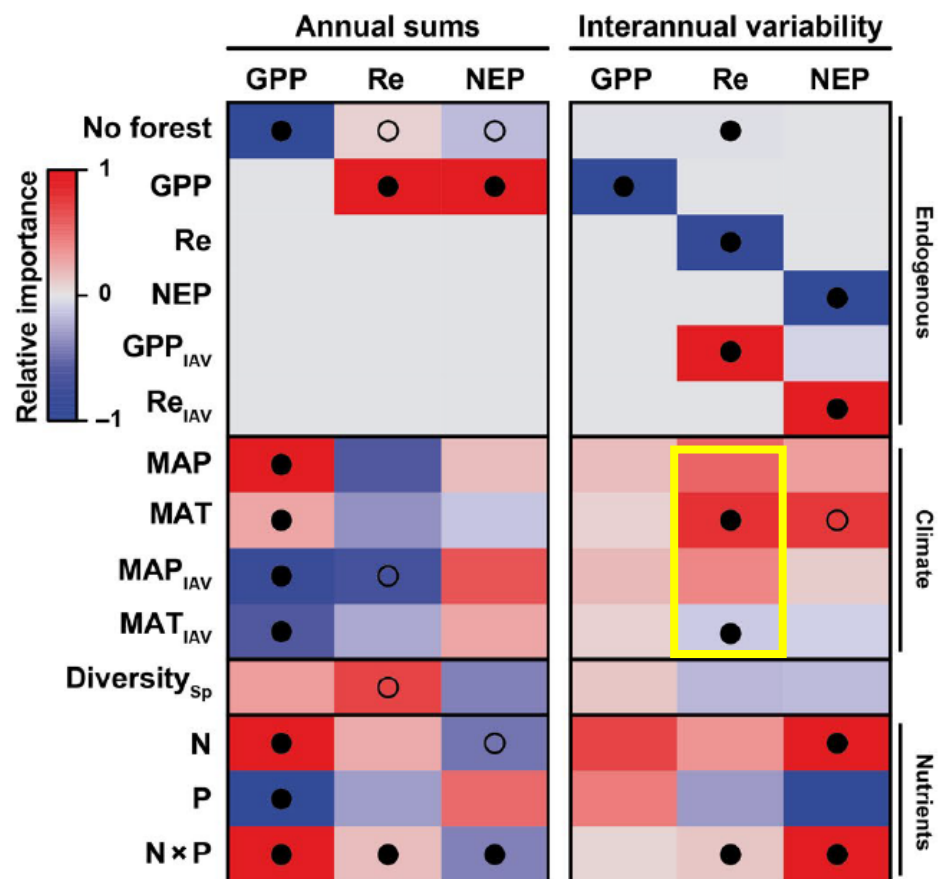
(Huang *et al.*, *Sci. Adv.*, 2020)

土壤呼吸的长期变化趋势也存在不确定性

陆地生态系统呼吸的年际变化及其影响因子



(Jung *et al.*, 2017)



(Fernández-Martínez *et al.*, 2020)

➤ 生态系统呼吸(ER)年际变异的驱动因素尚未明确

科学问题

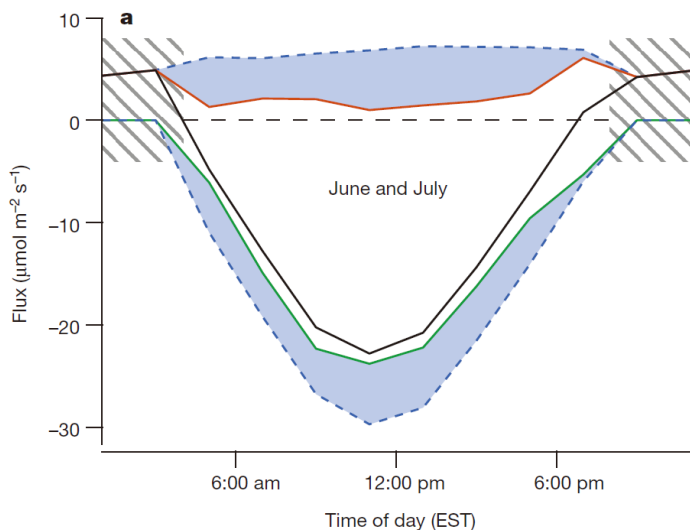
- 如何更精确地估算陆地生态系统呼吸？
- 近三十年来，全球陆地生态系统呼吸的变化趋势如何？其长期变化的主导因子是什么？

研究内容一：改进生态系统呼吸的估算方法

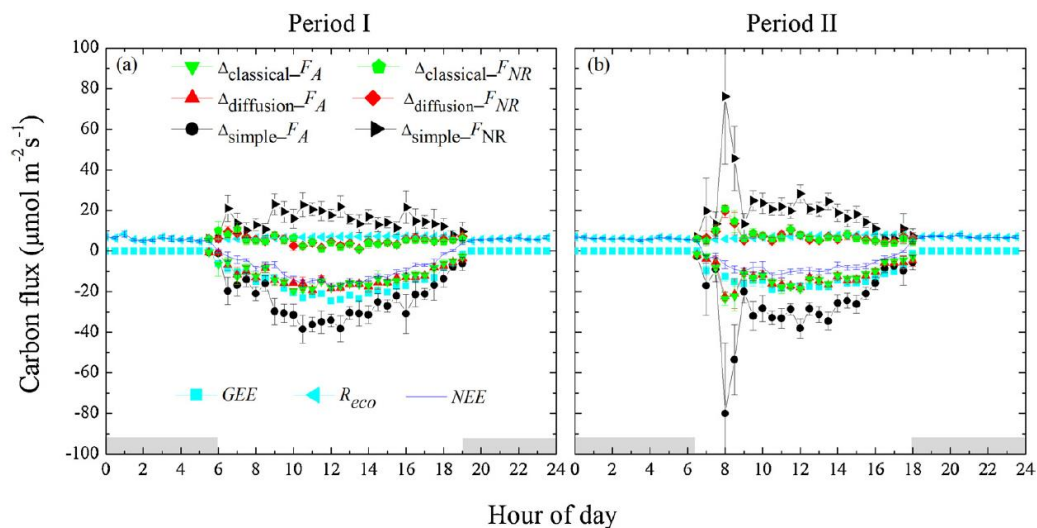
Li N, Zhou X, et al. (2021) Improving estimations of ecosystem respiration with asymmetric daytime and nighttime temperature sensitivity and relative humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*, in revision

研究数据

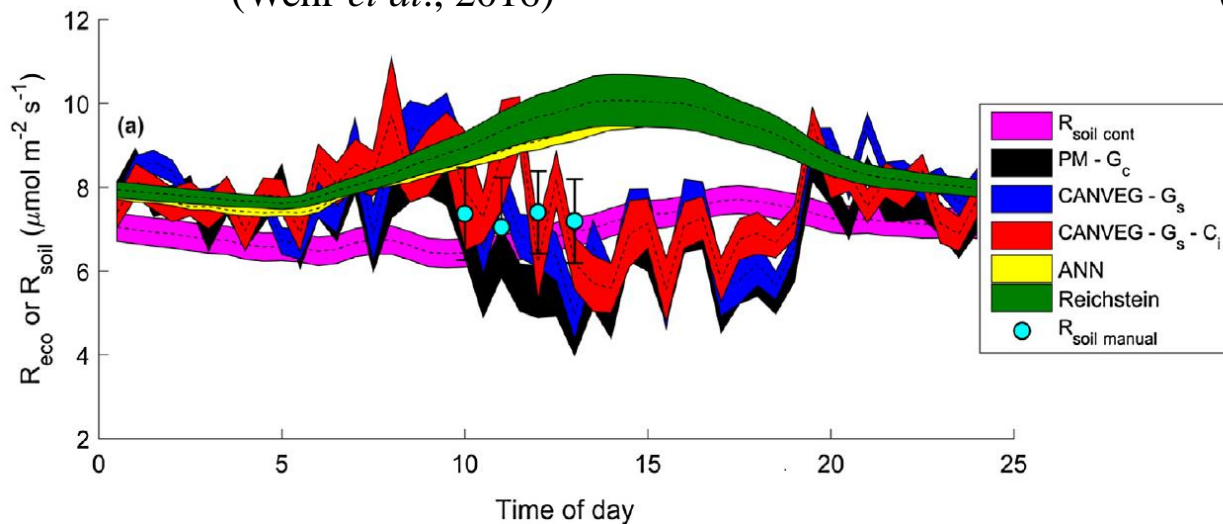
■ 稳定同位素测量



(Wehr *et al.*, 2016)



(Chen *et al.*, 2019)



➤ 通过采用新型同位素光谱仪和同位素分配理论的最新进展，能够实现对单个通量测量进行划分。

研究数据

■ 稳定同位素数据收集

Site	Latitude	Longitude	Vegetation type	MAT (°C)	MAP (mm)	Time span	Isotope disequilibrium	Reference
<i>US-Ha1</i>	42.54	-72.17	DBF	6.62	1071	2011-2013, 5-10	2‰	(Wehr et al., 2016)
<i>CN-Qia</i>	26.74	115.06	ENF	17.1	1377	2015, 7/24-8/7, 10/11-10/25	6.375‰	(Chen et al., 2019)
<i>US-Tw3</i>	38.12	-121.65	CRO	15.6	421	2015, 6/29-7/13	2.1‰	(Oikawa et al. 2017)

Harvard Forest



Qianyanzhou



Twitchell Alfalfa



研究数据

通量数据

NEE; ER

气象数据

Air temperature; Global radiation; VPD; Relative humidity;
Wind speed; Volumetric soil water content

Eddy-covariance measurements



CO₂通量拆分方法

Machine learning:

Artificial Neural Network (ANN); Random forest (RF)

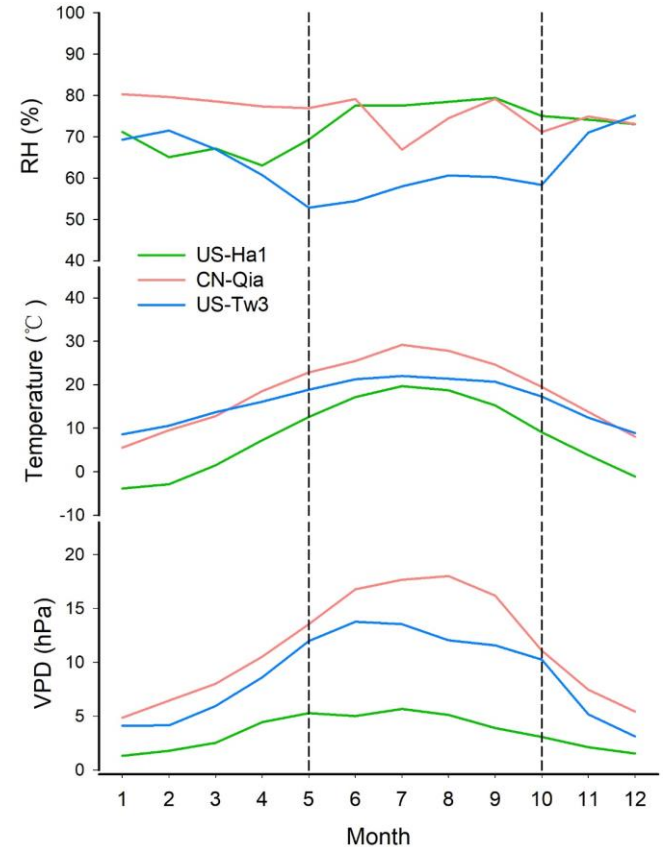
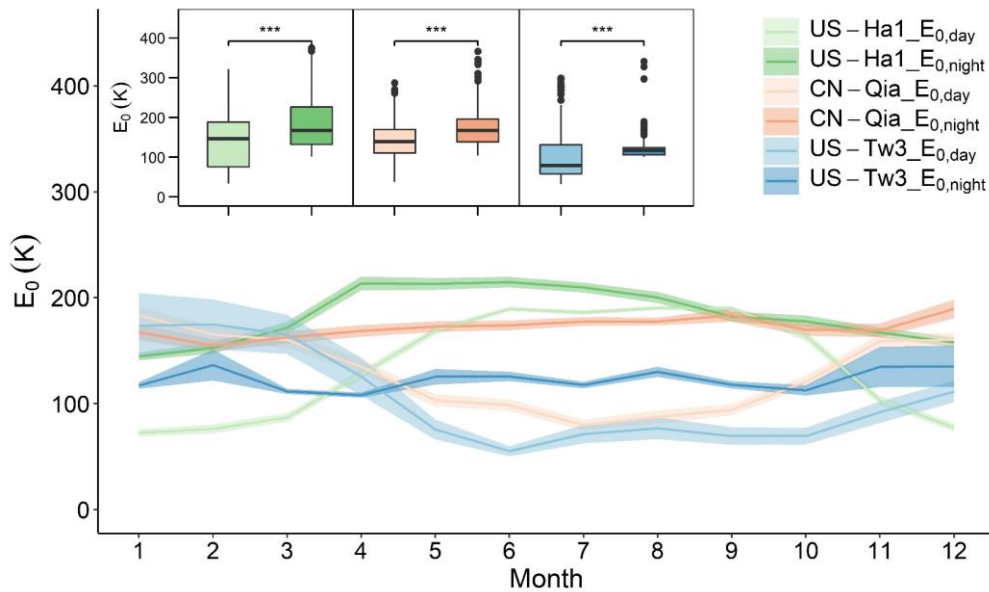
驱动变量:

Air temperature;
Global radiation;
VPD;
Relative humidity;
Wind speed;
Soil water content

模型性能评价

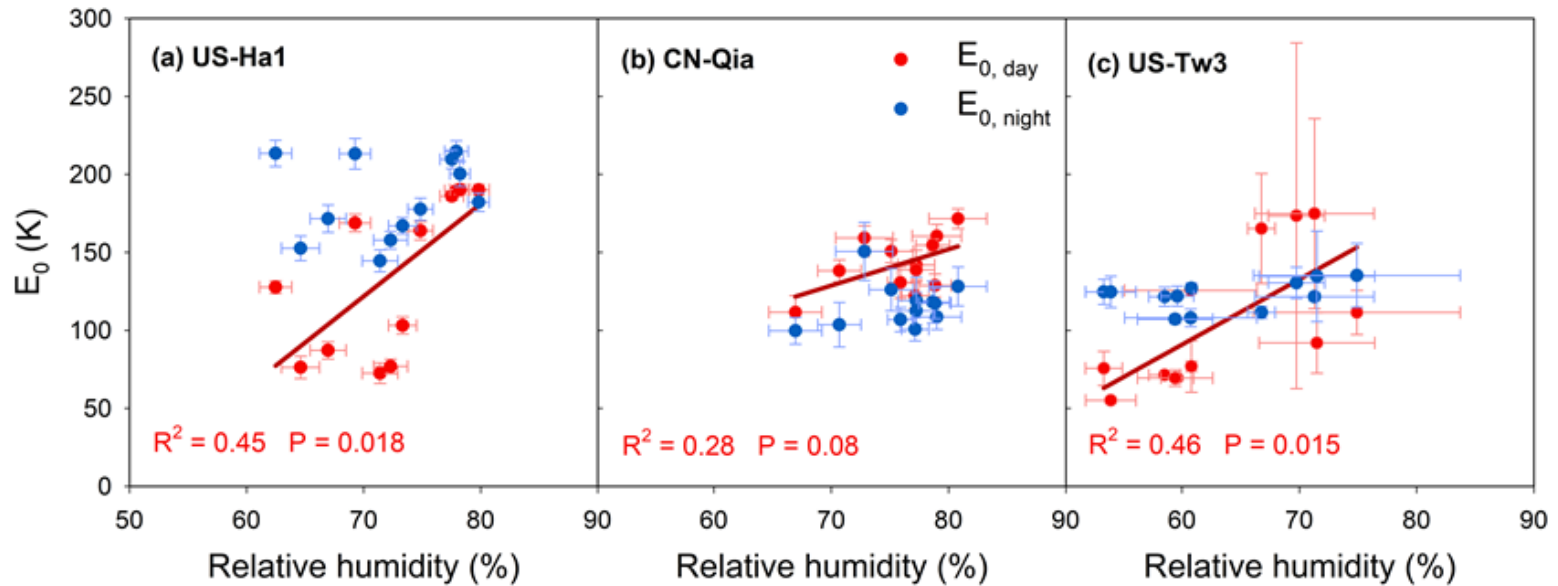
Model evaluation statistics	Hourly Daytime ER	
	ANN	RF
	<u>Testing dataset</u>	
R ²	0.41	0.39
RMSE	5.81	6.10
Modeling efficiency(EF)	0.37	0.30
Mean error (E)	0.84	0.45

生态系统呼吸的温度敏感性



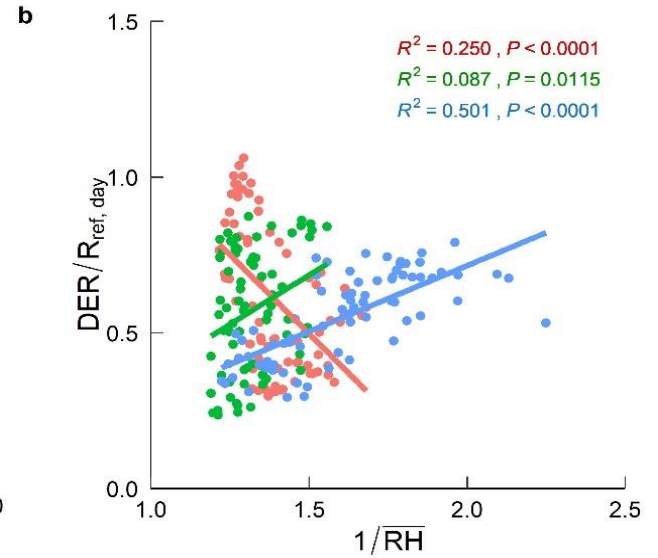
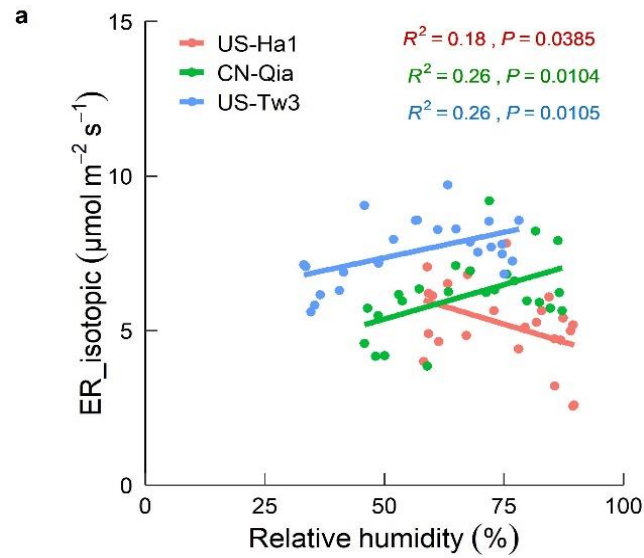
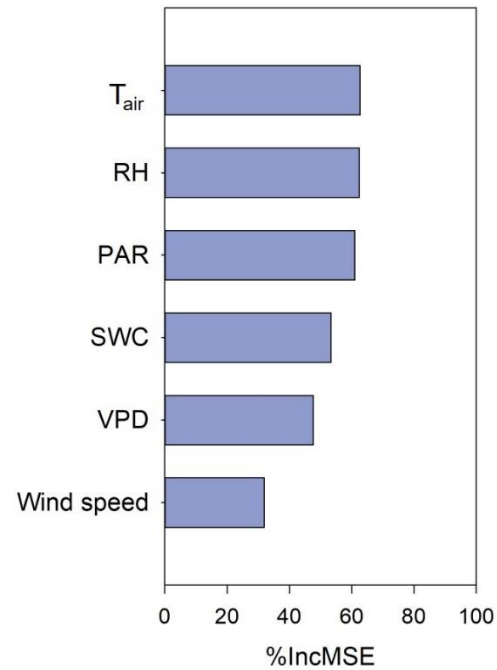
➤ 白天和夜间生态系统呼吸的温度敏感性存在显著差异

生态系统呼吸的温度敏感性



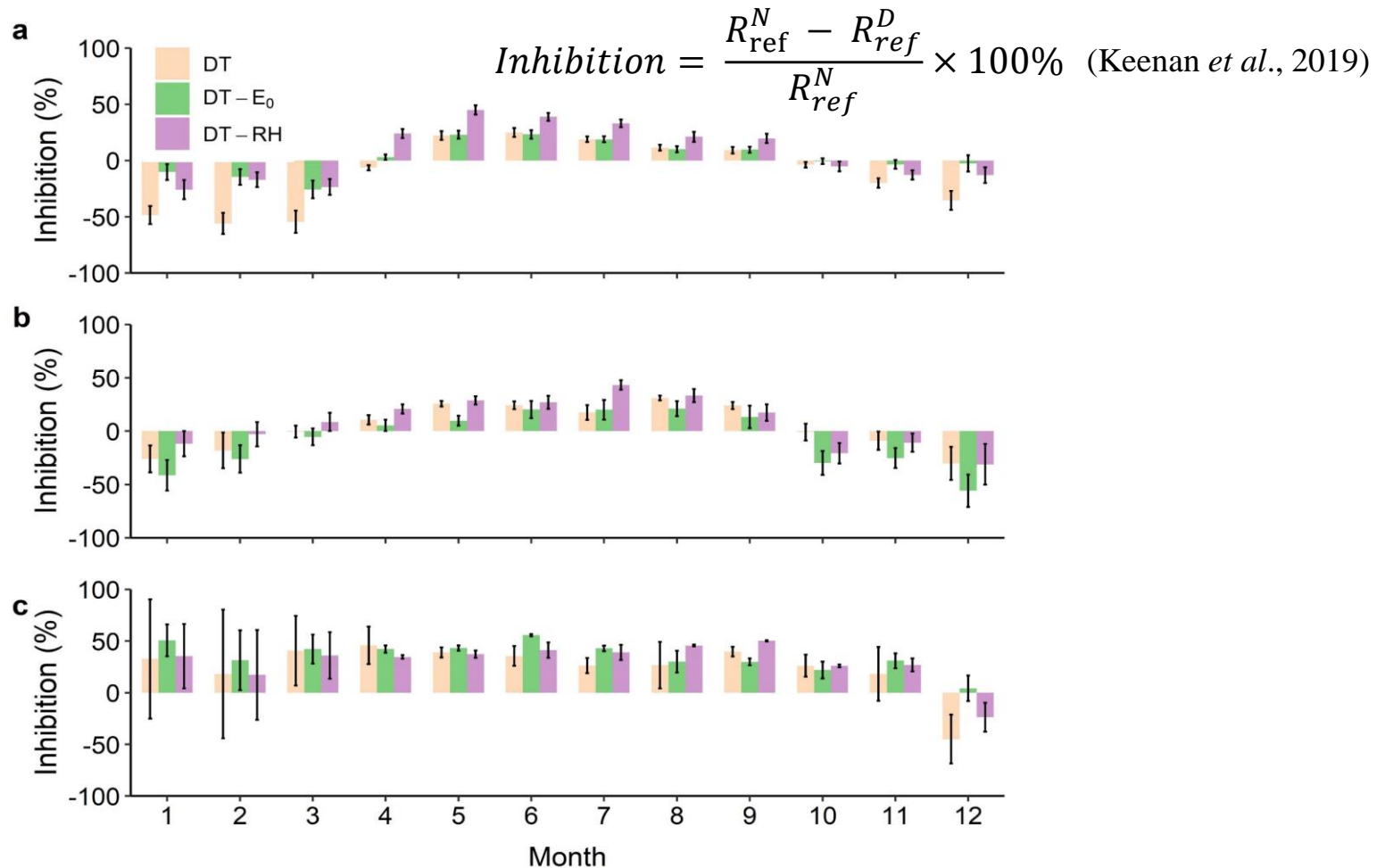
➤ 白天生态系统呼吸的温度敏感性与空气湿度有显著正相关关系

生态系统呼吸的水分响应



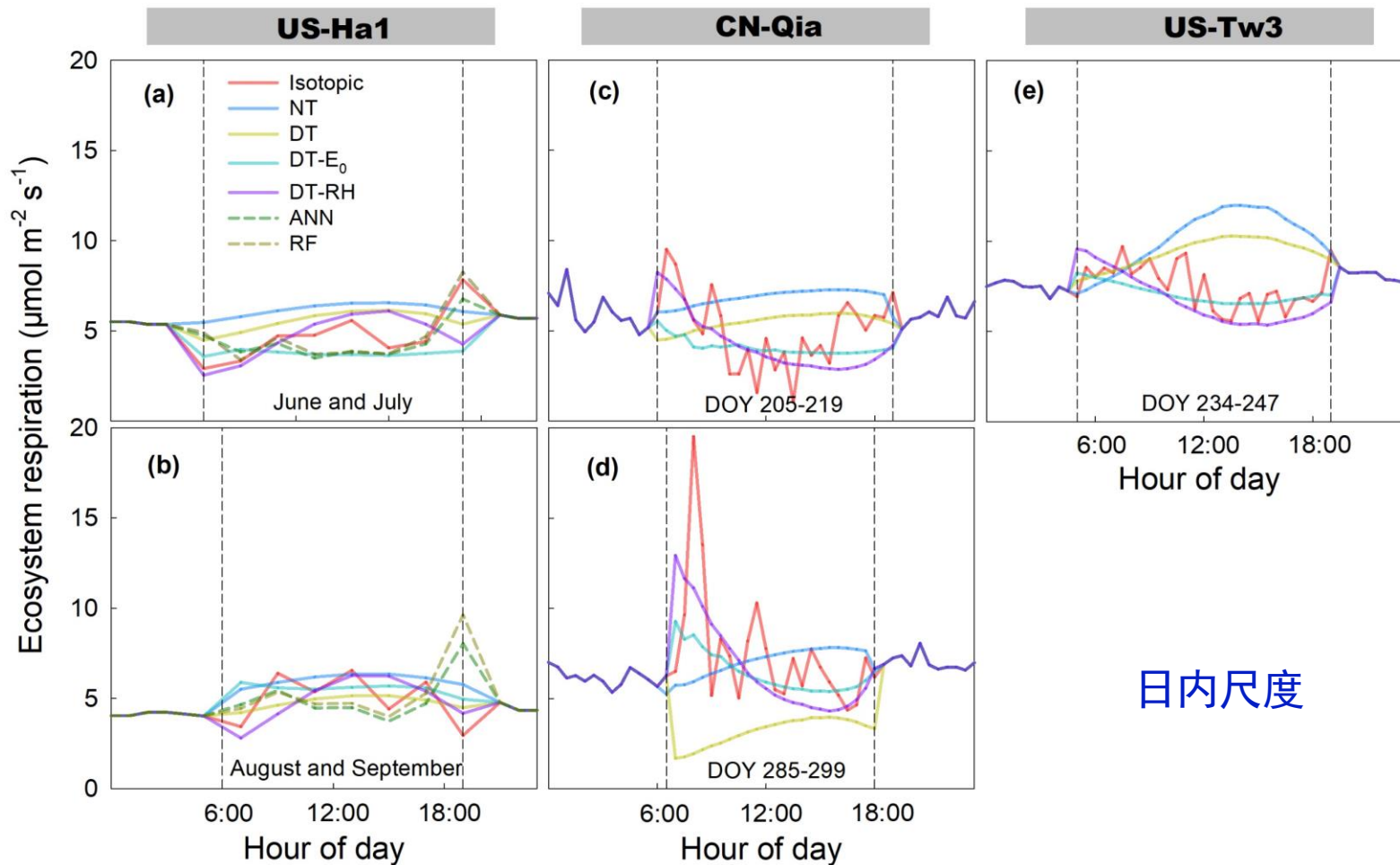
➤ 生态系统呼吸对空气湿度的响应因生态系统类型而异

生态系统呼吸的光抑制



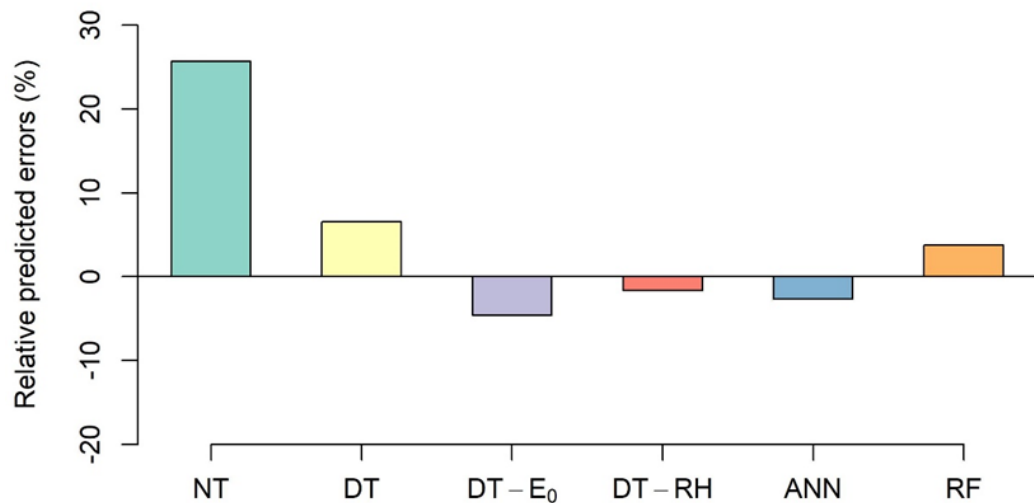
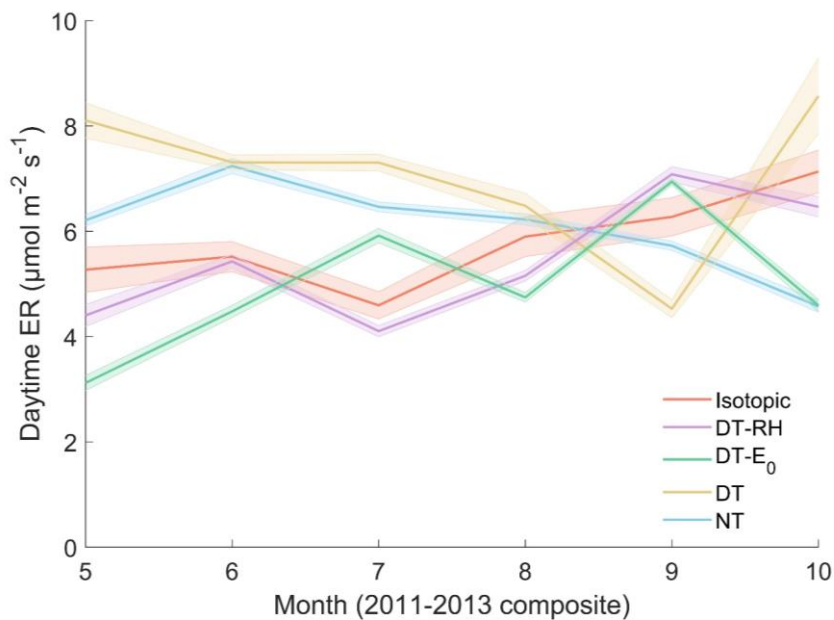
- 在森林生态系统的生长季，忽略水分条件的影响可能导致呼吸光抑制程度被低估

多种估算方法结果比较



➤ DT-RH估算的ER与同位素数据的匹配程度较其他方法更好

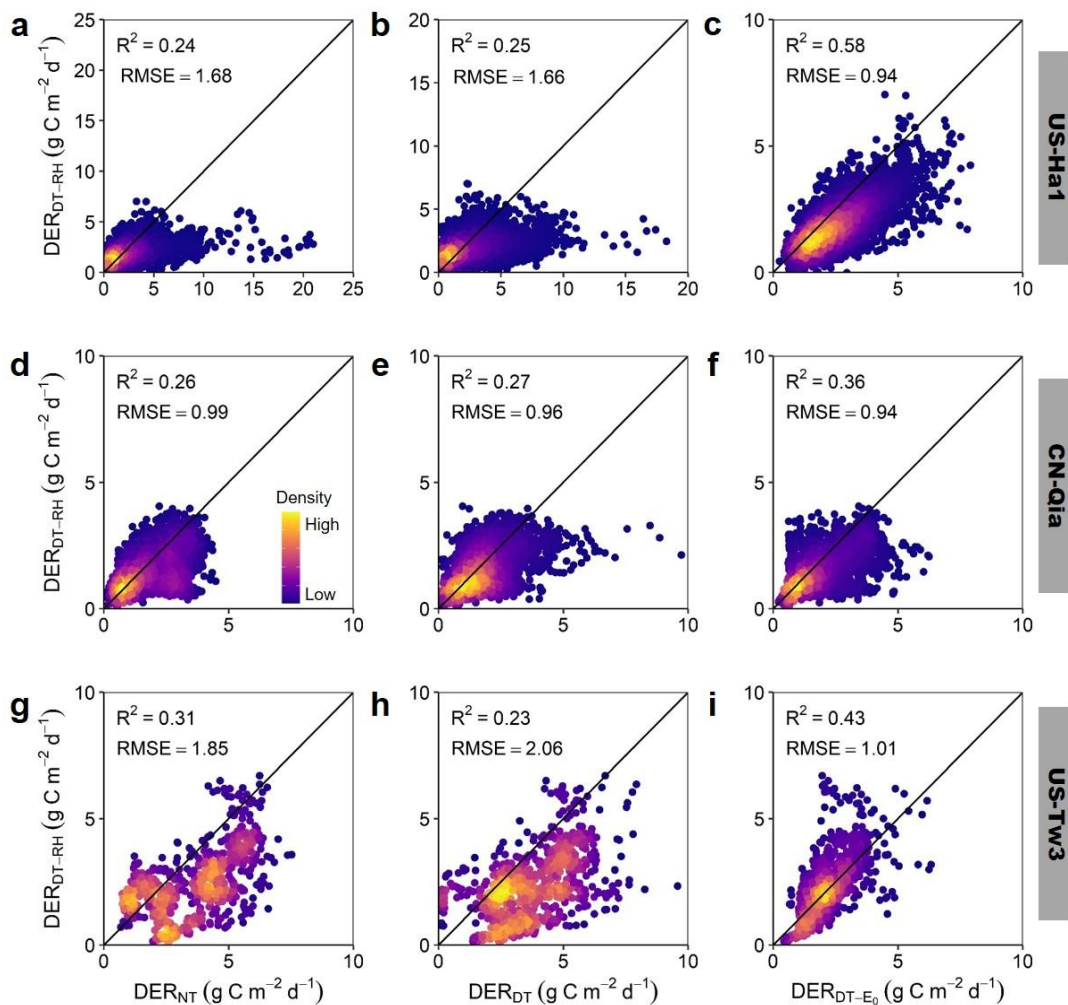
多种估算方法结果比较



➤ 在US-Ha1站点生长季，DT-RH方法估算的生态系统呼吸偏差最小

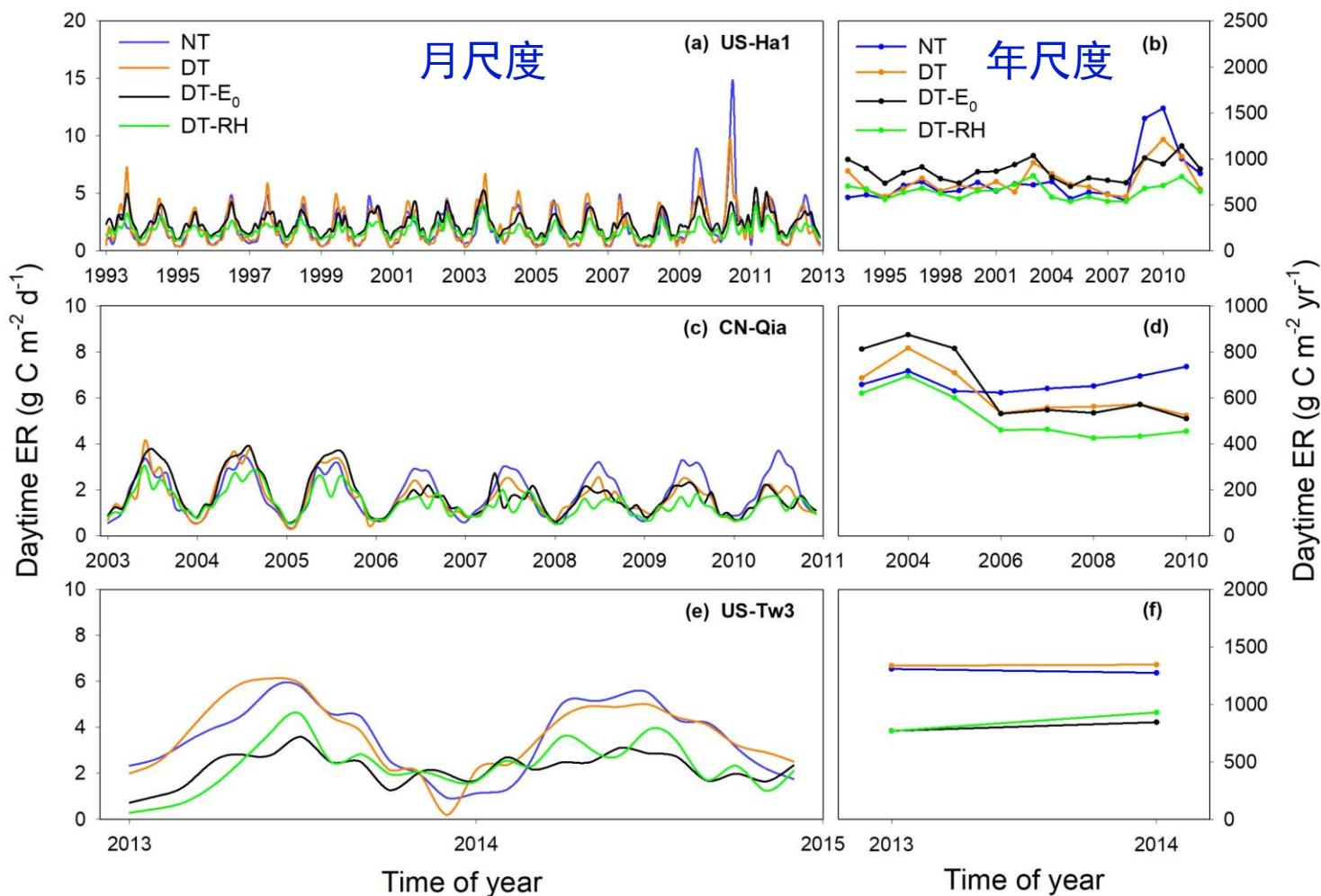
多种估算方法结果比较

日尺度



➤ DT-RH估算的白天生态系统呼吸日均值比使用NT和DT方法低16~37%

多种估算方法结果比较



- 不同方法估算的ER差异主要表现在生长季，且在年尺度上农田生态系统的这一差异比森林生态系统更大

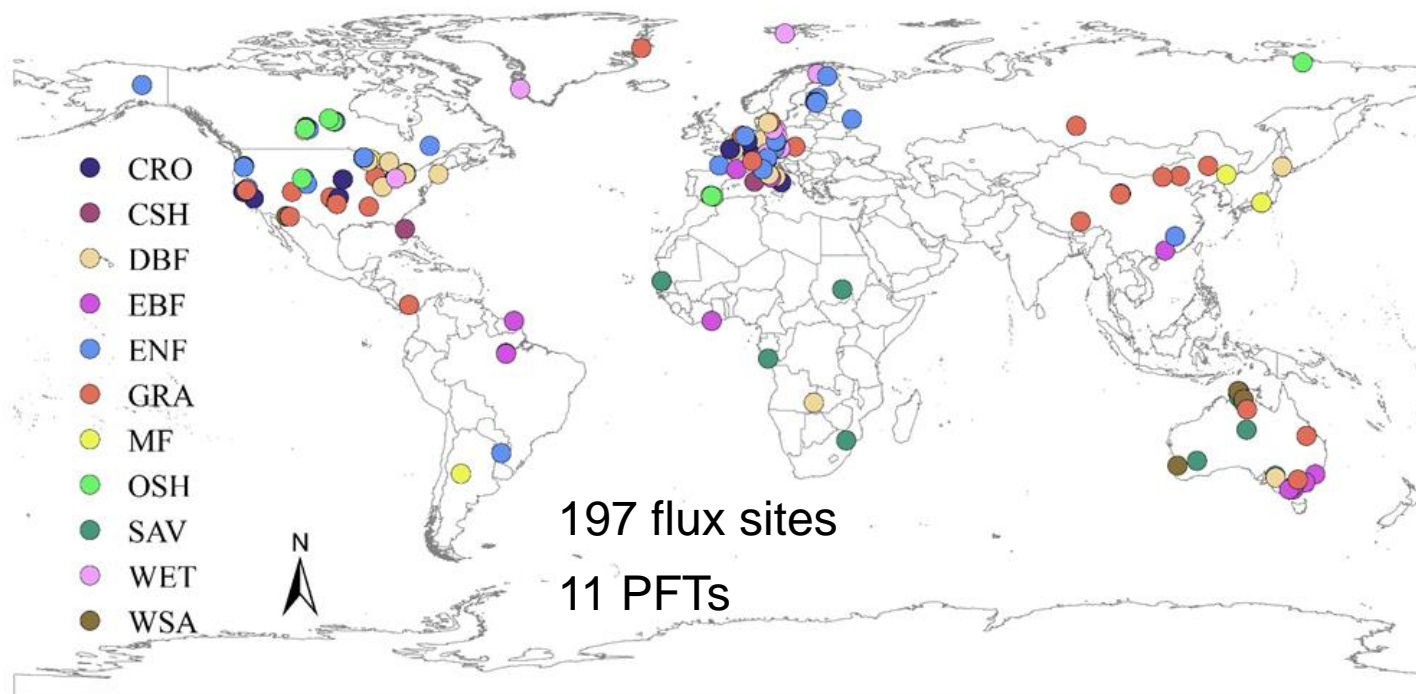
小结

- **白天和夜间**生态系统呼吸的**温度敏感性存在显著差异**，且随季节和生态系统类型而变化。
- **生态系统呼吸(ER)与空气湿度**有**显著相关**关系，忽略水分条件的影响可能导致森林生态系统的**呼吸光抑制程度被低估**。
- **DT-RH**方法通过整合ER的昼夜温度敏感性差异及其对空气相对湿度的响应**提高了ER的估算精度**，并发现**ER在不同时间尺度上的模式可能与以前认为的明显不同**。

研究内容二：1989-2018年陆地生态系统呼吸 的变化趋势及其影响因素

研究数据

- FLUXNET 2015 Dataset



■ Boreal {MAT < 2°C} ■ Temperate {2°C ≤ MAT ≤ 17°C} ■ Tropical {MAT > 17°C}

研究数据

- 驱动数据

Variables	Variable name	Dataset	Spatial resolution / Temporal resolution
RH	相对湿度	ERA5	0.5° / monthly
Vap	实际水汽压	CRU TS v4.04	
Tmin	日最低温	CRU TS v4.04	
Tmax	日最高温	CRU TS v4.04	
Tair	日温	CRU TS v4.04	
DTR	日温差	CRU TS v4.04	
Rg	太阳辐射	ERA5	
Pre	降水	CRU TS v4.04	
PET	潜在蒸散量	CRU TS v4.04	
SoilM	土壤体积含水量	ERA5	
SPEI	干旱指数	-	
Frs	霜冻日频率	CRU TS v4.04	
Wet	雨天频率	CRU TS v4.04	

数据分析方法

Machine Learning (e.g. RF, AutoML): 目的是将站点尺度的生态系统呼吸(ER)升尺度到全球。

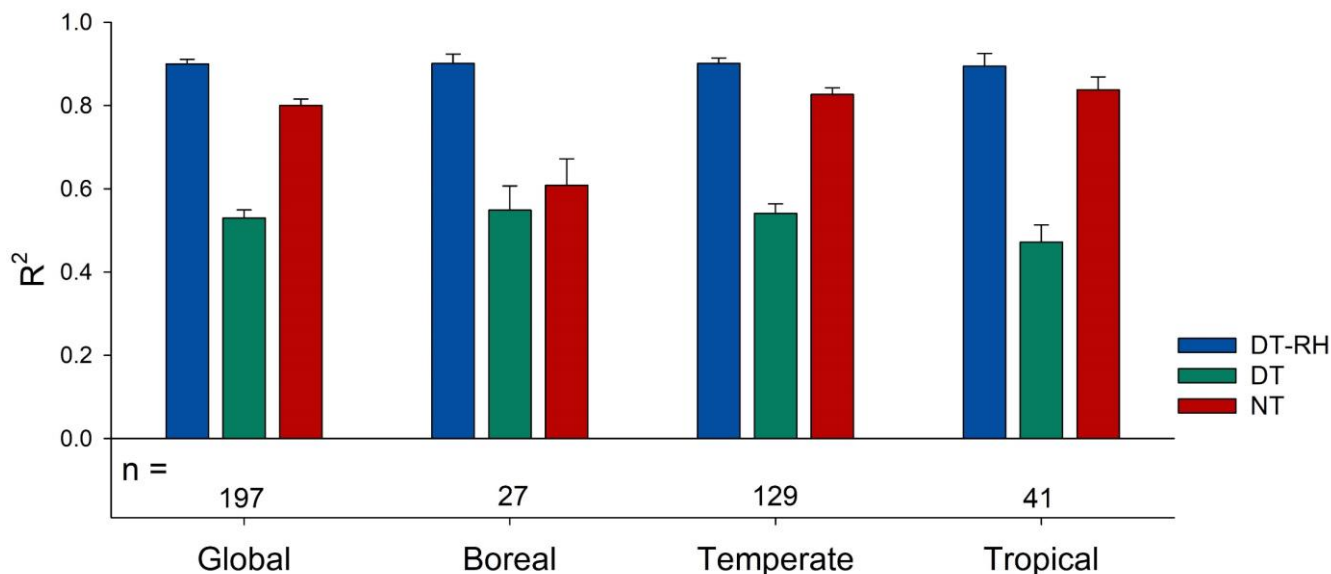
趋势分析(Theil-Sen median trend analysis and Mann-Kendall test): 目的是分析1989-2018年ER的时间变化趋势。

去趋势(detrend)处理: 目的是避免自相关, 并将分析集中在数据趋势本身的波动上。

随机森林和偏相关分析: 目的是逐像元分析影响ER年际变化主要因子的相对贡献。

模型性能评估

- 夜间NEE观测值与估算值比较——FLUXNET



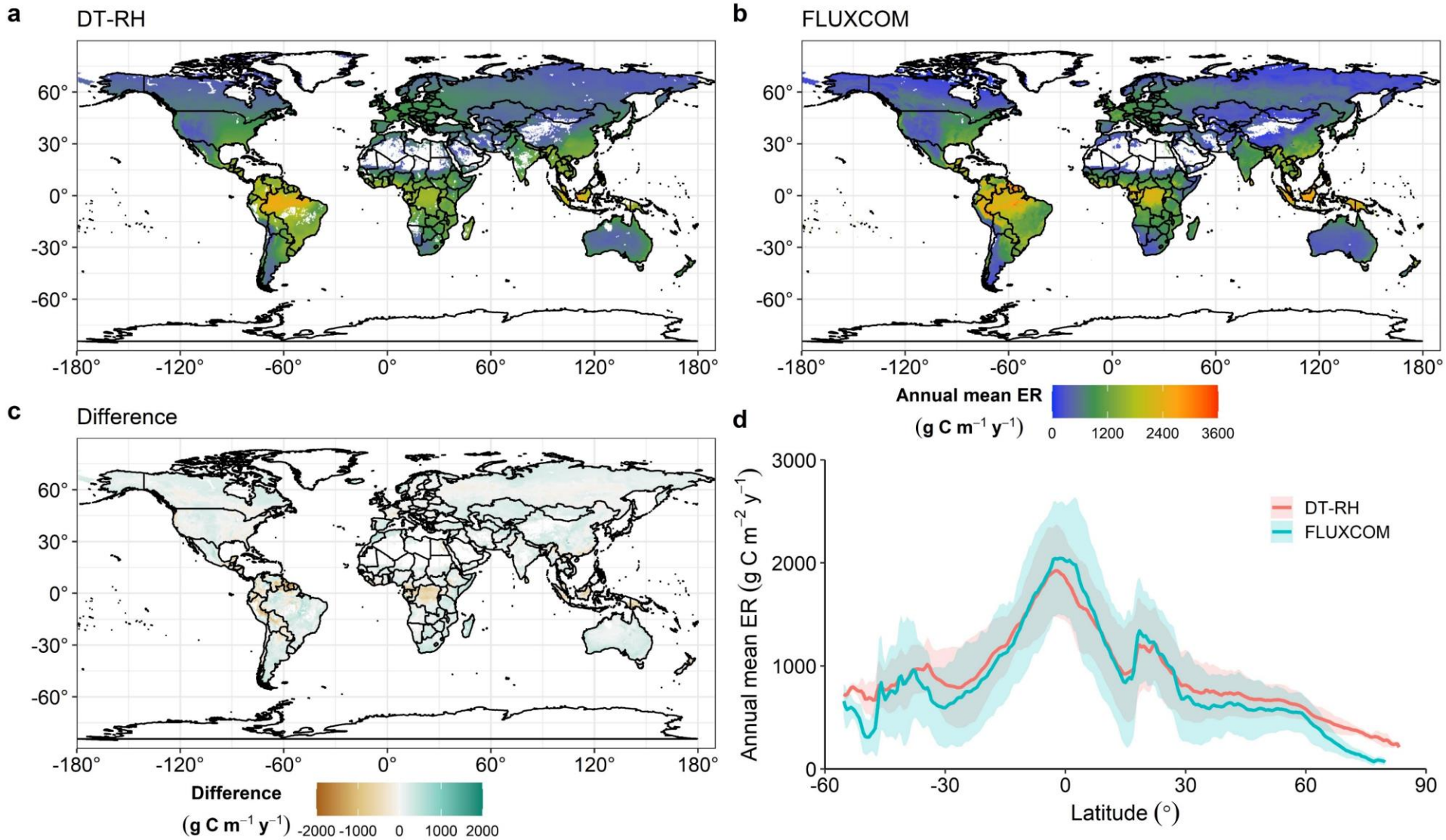
- 随机森林方法模型性能评估——Upscaling

RF model evaluation statistics	R ²	RMSE	MAE	RMSLE
Training dataset	0.713	26.462	18.528	0.401
Testing dataset	0.715	26.322	18.525	0.402

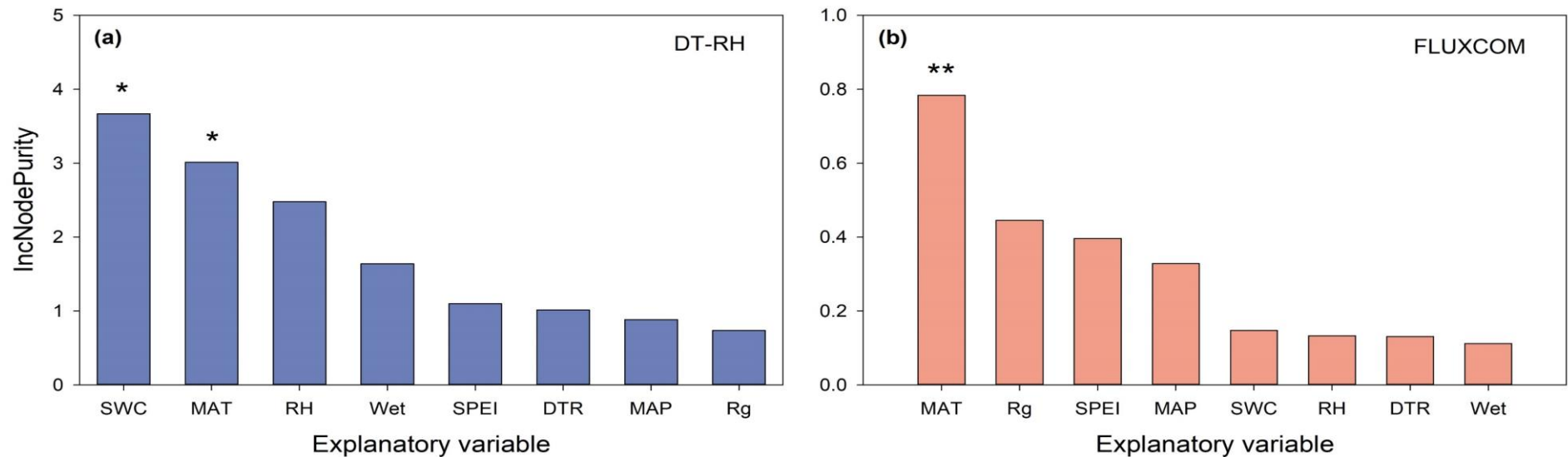
多个陆地生态系统呼吸产品比较

Period	Annual ER (Pg C yr ⁻¹) (mean±sd)	Spatial resolution	Model	Reference
1989-2018	122.77±0.73	0.5°×0.5°	DT-RH	This study
1989-2018	115.51±0.31	0.5°×0.5°	NT	Jung et al., 2020
1989-2018	116.21±0.31	0.5°×0.5°	FLUXCOM DT	Jung et al., 2020
1980-2014	130.04±3.90	1.125°×1.121°	BCC-CSM2-MR	Wu et al., 2018
1980-2014	136.13±4.17	1.25°×0.94°	CESM2	Danabasoglu et al., 2019
1980-2014	135.05±5.25	1.25°×0.94°	CMCC-ESM2	Lovato et al., 2021
1980-2010	131.61±2.45	0.5°×0.5°	BIOME-BGC	Running and Hunt, 1993
1980-2010	138.13±3.84	0.5°×0.5°	CLM4	Oleson et al., 2010
1980-2010	103.83±2.85	0.5°×0.5°	DLEM	Tian et al., 2015

生态系统呼吸的空间格局

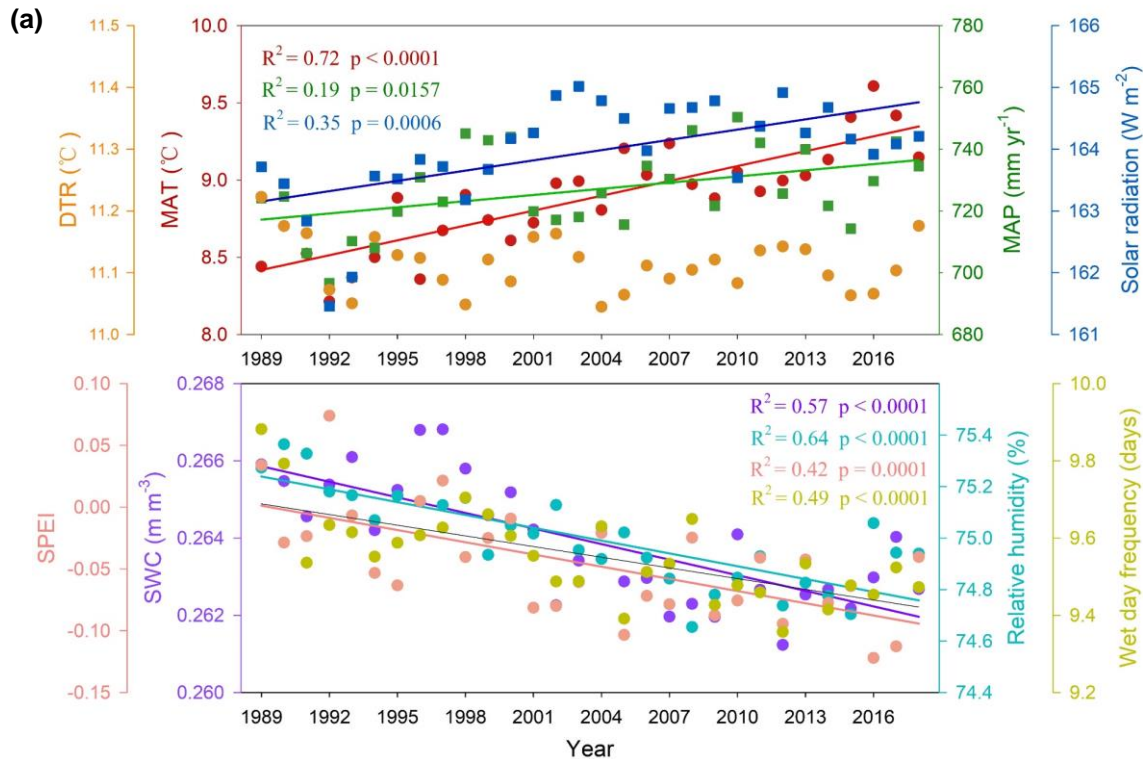


生态系统呼吸长期变化趋势的驱动因素



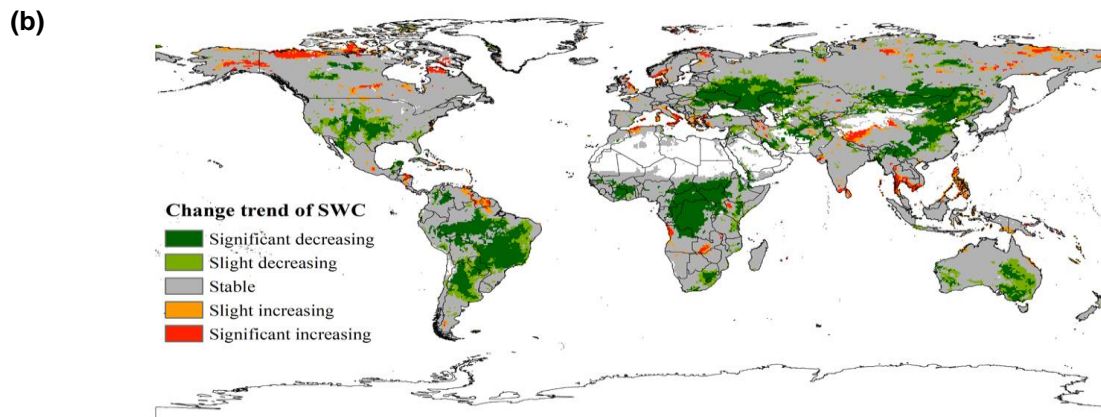
- **温度和土壤湿度**是影响全球生态系统呼吸长期变化趋势的主要因素

环境因子的长期变化趋势



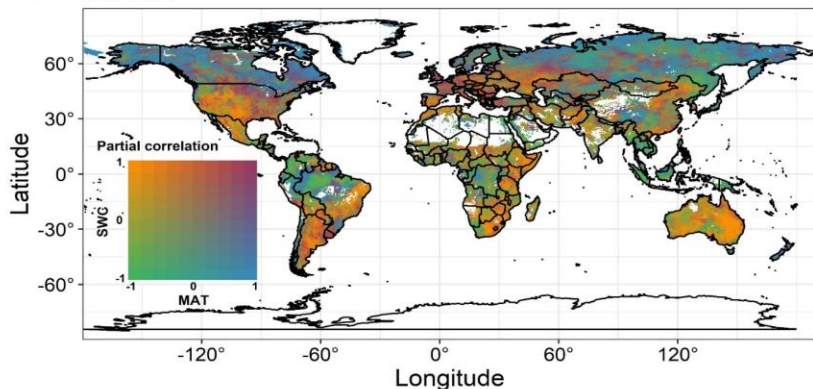
➤ 1989-2018年，全球温度、降水及太阳辐射呈现显著**上升趋势**

➤ 1989-2018年，全球土壤湿度、空气湿度、干旱指数及降雨频率呈现显著**下降趋势**；其中土壤湿度在温带和热带大部分地区下降趋势最明显

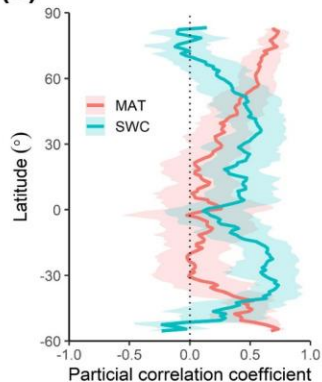


1989-2018年全球ER变化与温度和土壤湿度的关系

(a) DT-RH

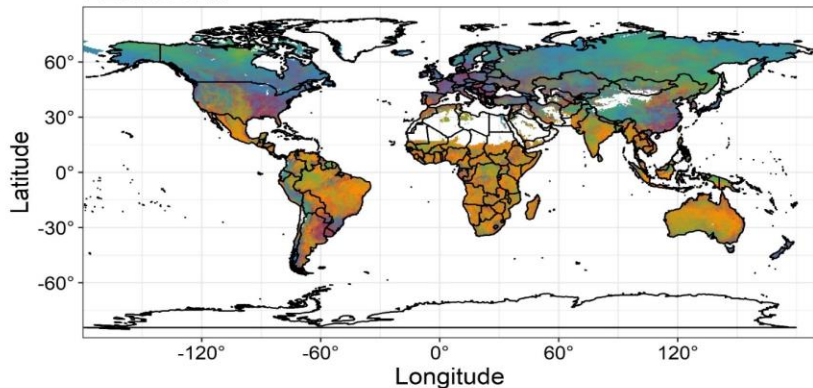


(b)

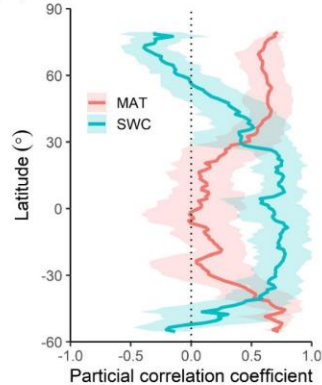


➤ 水分条件的变化比热条件对ER长期变化趋势的贡献更大，尤其是在温带和热带地区

(c) FLUXCOM

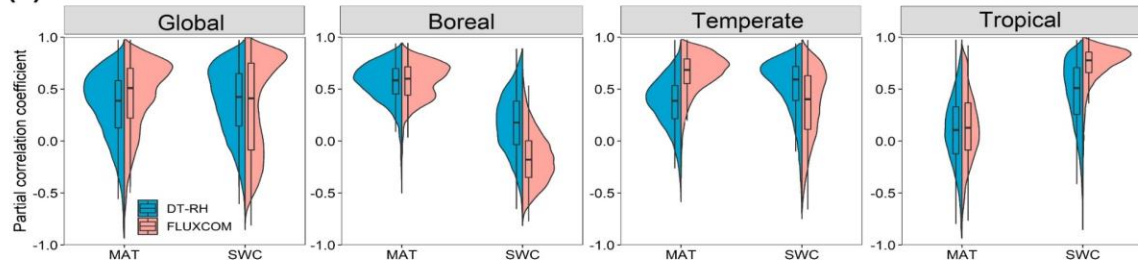


(d)



➤ FLUXCOM产品低估了温带地区水分条件对ER的影响，可能是导致其全球ER呈现上升趋势的主要原因

(e)



结论

- 1989-2018年，**全球ER呈显著下降趋势**。其中，**温带和热带**部分地区的生态系统呼吸呈现**显著下降趋势**，但寒带地区整体上呈现上升趋势。
- **土壤水分变化显著影响着全球ER的长期变化**，特别是在温带和热带地区，但在高纬度地区（寒带），ER的时间变化主要是由温度波动驱动的。
- 全球陆地模型没有捕捉到土壤水分减少期间明显下降的呼吸作用。



谢谢!

敬请批评指正