



中国科学院地理科学与资源研究所
Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research, CAS

基于通量数据的集成分析

报告人： 陈 智

ChinaFLUX第10次通量观测理论与技术培训

2015-05-23



Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling



问题1：通量数据有何用？

通量数据可反映生态系统内的多个**生物学过程**（例如光合作用、呼吸作用、蒸腾作用），其数值可表征生态系统的**碳源汇功能、水分利用效率等**





用于研究

■ 碳交换过程或碳源汇强度的**季节动态**及调控机制

(Goulden et al., 2004; Zhang et al., 2006; Brümmer et al., 2008);

■ **年际变异特征**及控制因子

(Yu et al., 2008; Wilkinson et al., 2012; Mizoguchi et al., 2012);

■ **空间格局特征**及调控因子

(Law et al., 2002; Reichstein et al., 2007; Kato et al., 2008);

■ **极端气候**对碳交换过程或碳源汇强度的影响

(Ciais et al., 2005; Reichstein et al., 2007; Wen et al., 2010);

■ 火灾、虫灾等**自然灾害**，放牧、砍伐、施肥等**人为活动**对碳交换过程或碳源汇强度的影响

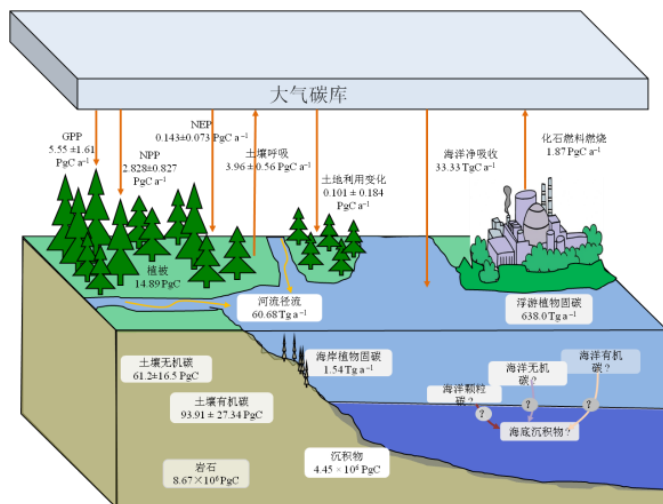
(Dore et al., 2010; Amiro et al., 2010);



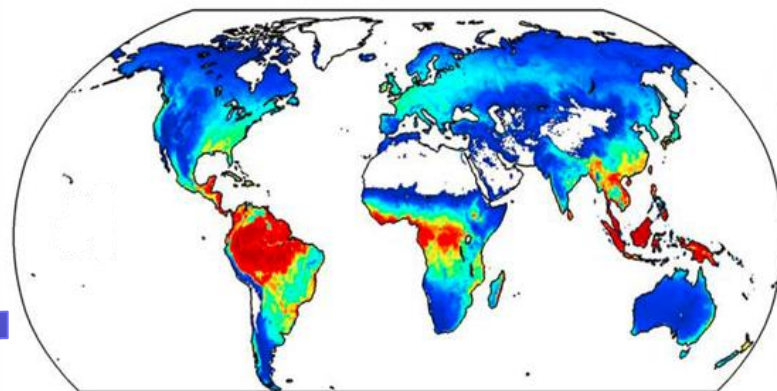


研究背景

全球变化与生态系统碳循环研究



陆地生态系统碳吸收功能



碳吸收强度空间变异

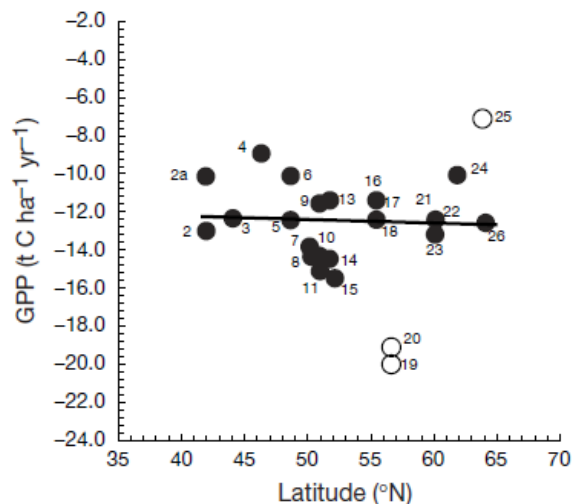
揭示**生态系统碳收支的空间格局及其调控机制**

是全面认识全球碳循环过程、准确预测和评估全球碳收支的关键

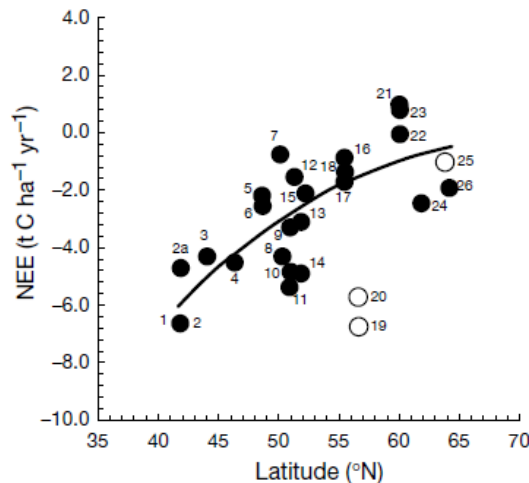




碳通量空间格局研究

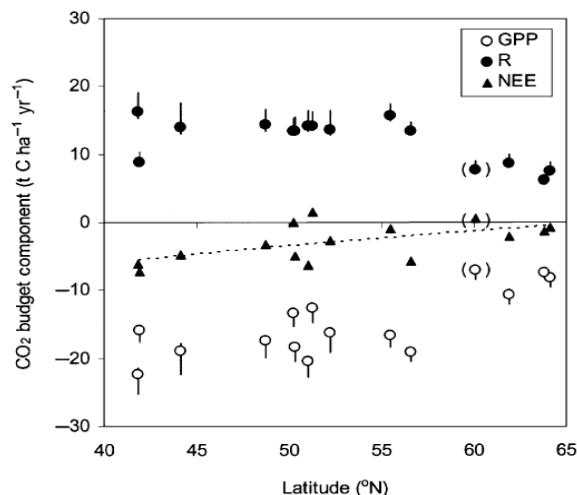


(Valentini et al., 2000, Nature)



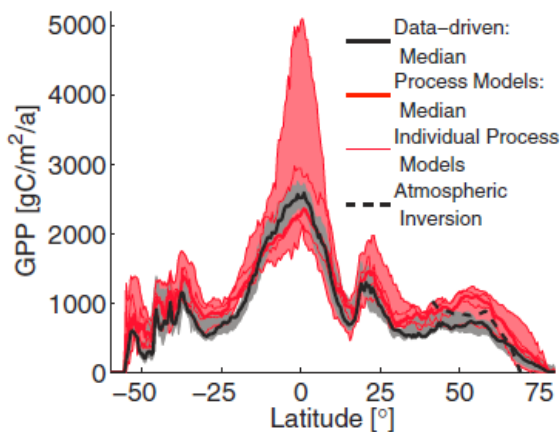
碳通量空间格局

(Valentini et al., 2000;
Van Dijk et al., 2004;
Luyssaert et al., 2007;
Beer et al., 2010)



(Van Dijk et al., 2004, GCB)

(Beer et al., 2008, Science)

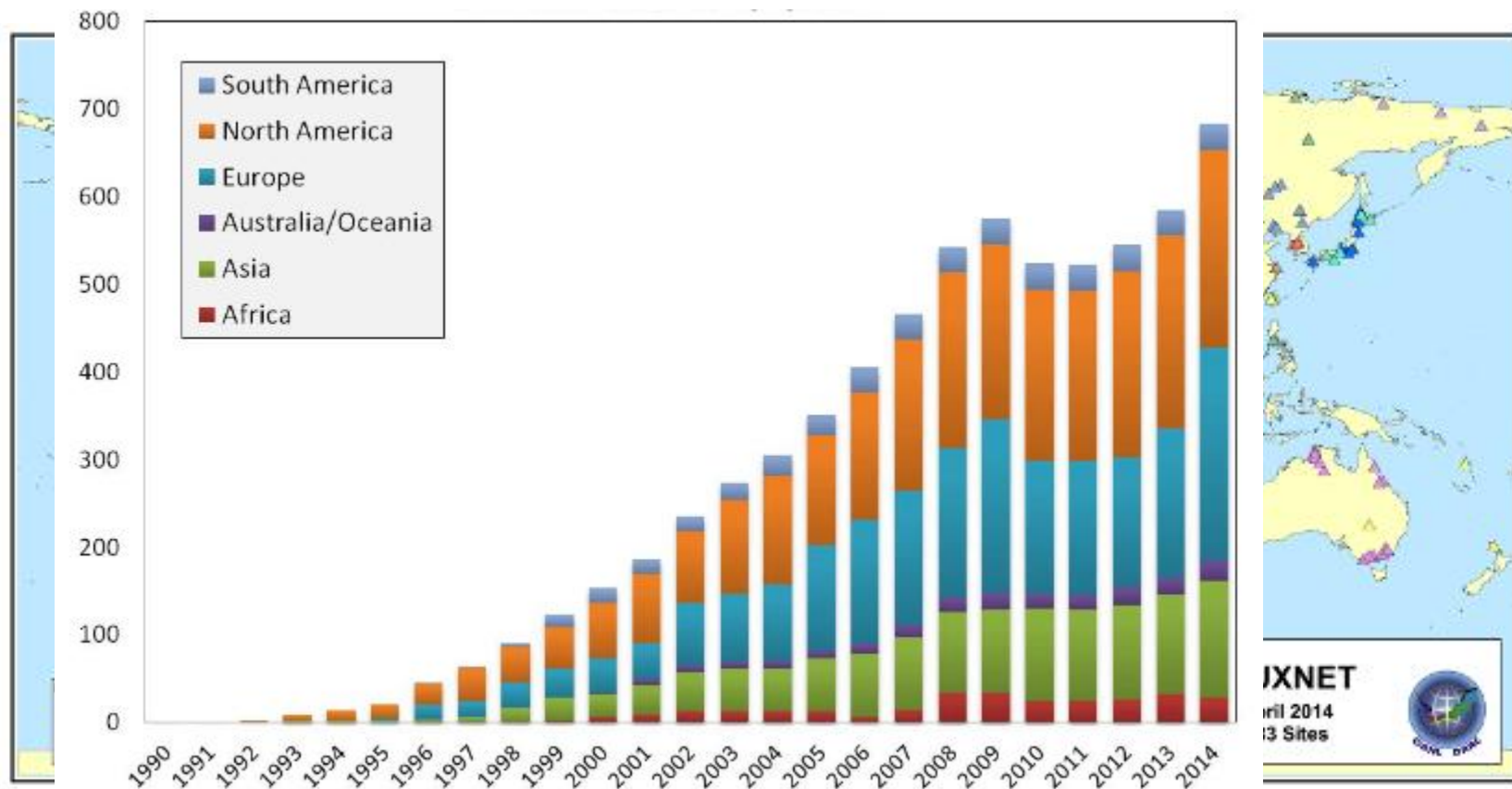


对碳通量空间格局
的认识受到研究的空间
范围的影响。小空间研
究跨度将掩盖大尺度的
空间变异格局。





全球通量站点分布



截止到2014年4月1日，FLUXNET统计全球通量站点683个。





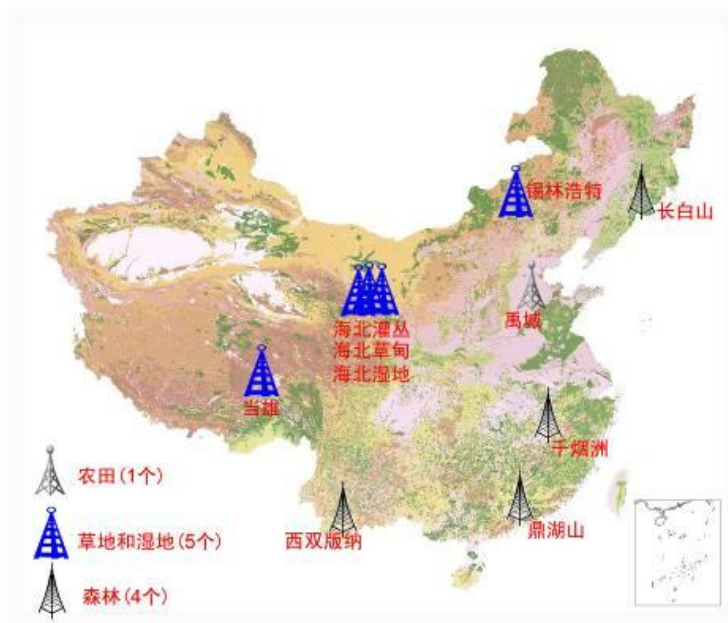
问题2： 通量数据从何来？



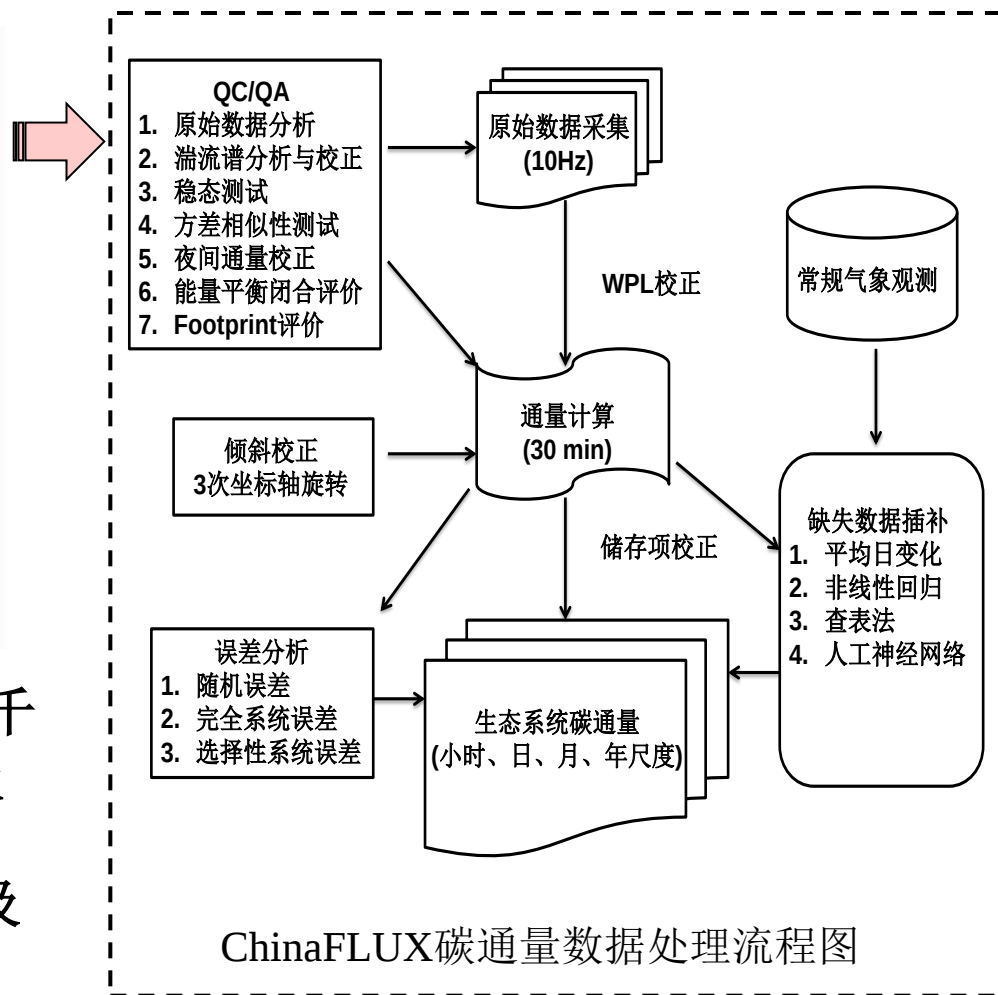


研究数据与方法

1. ChinaFLUX碳通量数据



- ✓ ChinaFLUX的8个通量站点（千烟洲、长白山、鼎湖山、西双版纳、内蒙、当雄、禹城、海北）
- ✓ 2003-2008年30分钟的碳通量及常规气象数据。





研究数据

2. 发表的北半球碳通量数据



涡度相关



森林

草地



农田

湿地

收集发表的采用涡度相关技术测定的生态系统碳通量数据

建立数据集

数据筛选

A	B	C	D	E	F	J	K
站点	站点简称	所属国家	Climate	Climate	纬度N/°	生态系统	林型
Pasoh Forest Reserve (PSO)		马来西亚	Af	Tropical	2.966667	森林	Tropical
Lambir		马来西亚	Af	Tropical	4.333333	森林	针阔混交林
Sakaerat		泰国	Aw	Tropical	14.48333	森林	常绿阔叶林
Mae Klong		泰国	Am	Tropical	14.58333	森林	落叶阔叶林

1. 经过校正

2. 至少一个完整年监测

3. 近10年未受强烈的干扰破坏

1. 坐标轴旋转
2. WPL校正
3. 储存项计算
4. 夜间数据校正
5. 缺失数据插补
6. 通量组分拆分

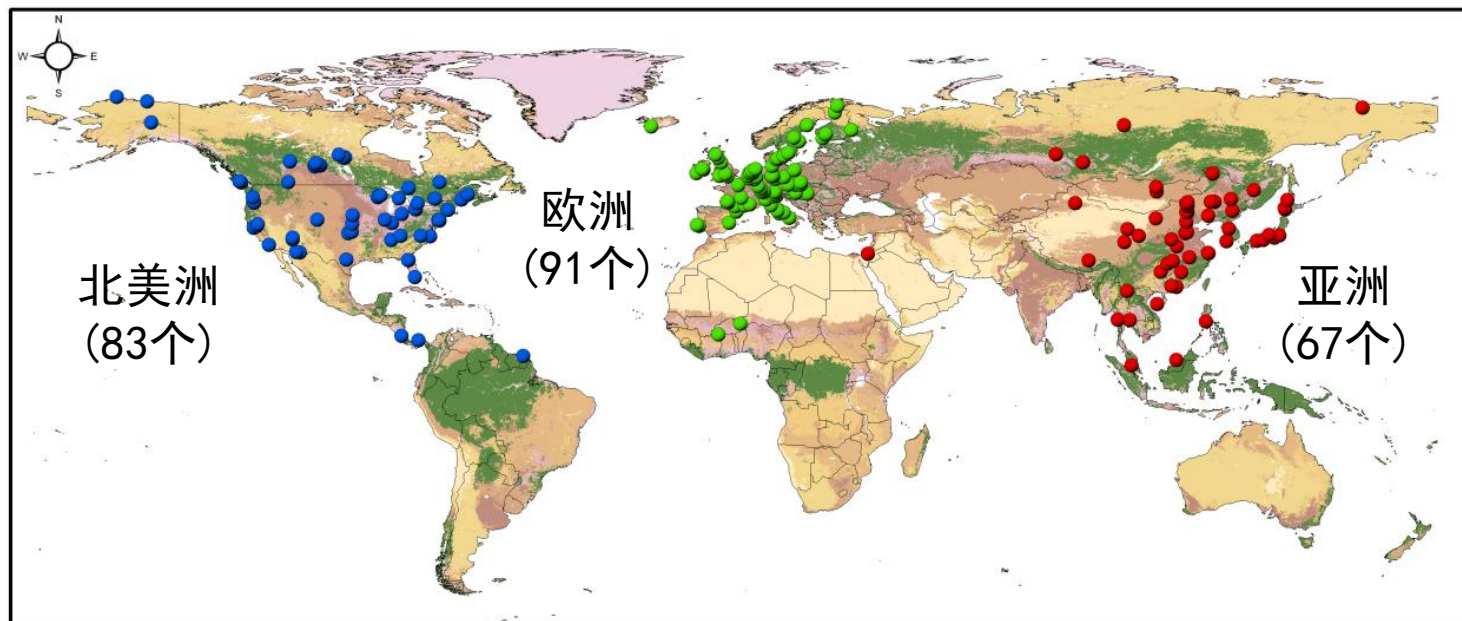
计算每个站点的多年平均碳通量





研究数据

3. 北半球碳通量数据分布



- ✓ 获取位于北半球的241个通量站点的861条有效的站点年碳通量数据。
- ✓ 涵盖了热带、亚热带、温带、北方林带、极地带和高山带六个气候带。
- ✓ 包括了常绿阔叶林(13)、常绿针叶林(64)、落叶阔叶林(25)、落叶针叶林(5)、针阔混交林(12)、草地(60)、农田(34)和湿地(28)八类生态系统。

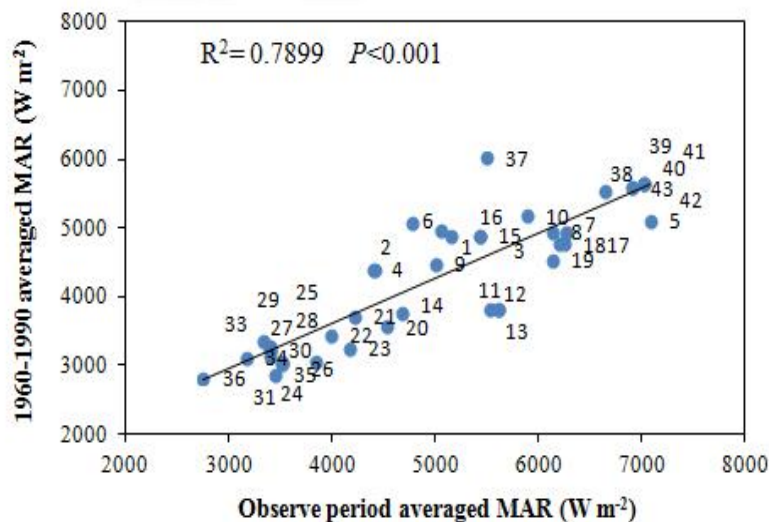




研究数据

4. 气候、土壤和植被数据

- 年均温和年总降水量—通量塔监测与全球地表气象数据的插补
- 年总辐射—月尺度气象数据集 (CRU05)的30年年均太阳总辐射



- 土壤有机碳含量—全球归一化土壤数据集的0-30 cm和30-100 cm层土壤有机碳含量
- 植被EVI—MOD13Q1的250 m空间分辨率，16天时间分辨率的全球EVI数据

$$Pix = \begin{cases} 1 & \text{if } pixel \text{ reliability} = 0, 1; \\ 0 & \text{if } pixel \text{ reliability} = 2, 3; \end{cases}$$

$$n_{i,j} = count(Pix = 1);$$

$$i = 1, 17, 33, \dots, 353; \quad j = 2000, 2001, \dots, 2010;$$

$$EVI_i = \begin{cases} \frac{\sum_{n=1}^{n_{i,j}} EVI_n}{n_{i,j}} & \text{if } n_{i,j} \geq 0.25N \quad (N = 81); \\ mis \sin g & \text{if } n_{i,j} \leq 0.25N \quad (N = 81); \end{cases}$$

$$\overline{EVI}_i = \frac{\sum_{i=1}^{353} EVI_i}{23} \quad i = 1, 17, 33, \dots, 353;$$

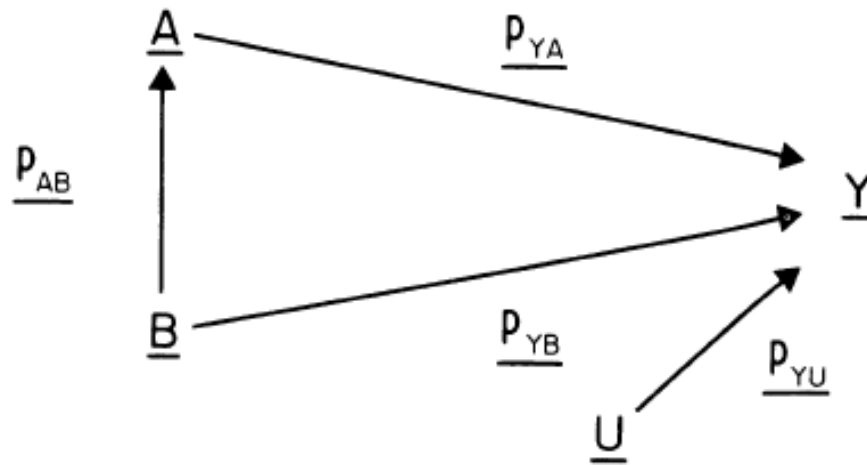




研究方法

1. 通径分析

通径分析(Path Analysis)是多元回归分析的扩展, 用来评估多个自变量对因变量的直接和间接控制作用 (Schemske and Horvitz. 1988)。



$$R_{AY} = P_{YA}$$

$$R_{BY} = P_{YB} + P_{YA} \times P_{AB}$$

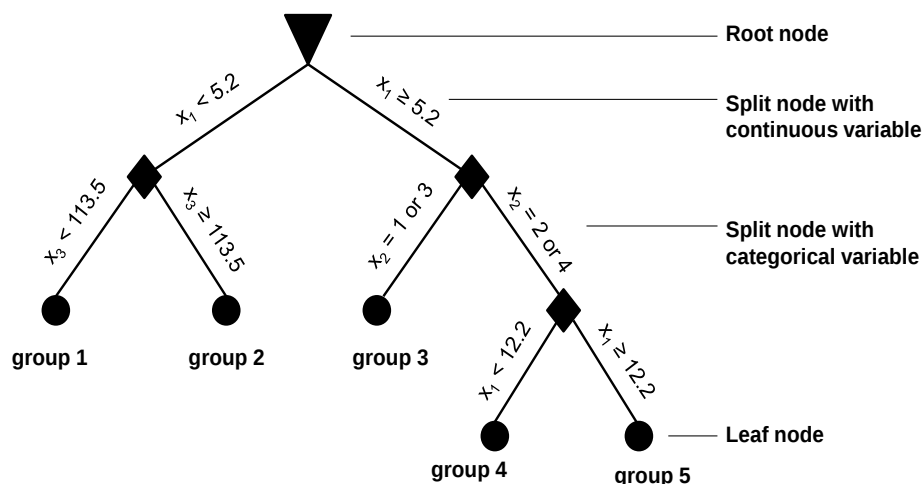
- ✓ P_{YA} : A对Y控制的直接通径系数(偏回归系数);
- ✓ P_{YB} : B对Y控制的直接通径系数;
- ✓ P_{AB} : B对A直接控制系数(相关系数)。





研究方法

2. 分层回归树分析



分层回归树用于解析不均一的复杂生态学数据，并且得出直观的分层结构结果 (Breiman et al., 1984; De'ath and Fabricius, 2000)。

3. 冗余分析

冗余分析是基于协方差分析，将每个变量依次定义为约束因子来计算每个自变量对因变量的解释度 (Oksanen, 2013)。





问题3：如何做通量数据的集成分析？





核心内容: 生态系统碳通量的空间格局及其调控机制

一

碳通量的区域统计特征

二

碳通量的空间变异规律

三

碳通量间的偶联关系及成因

四

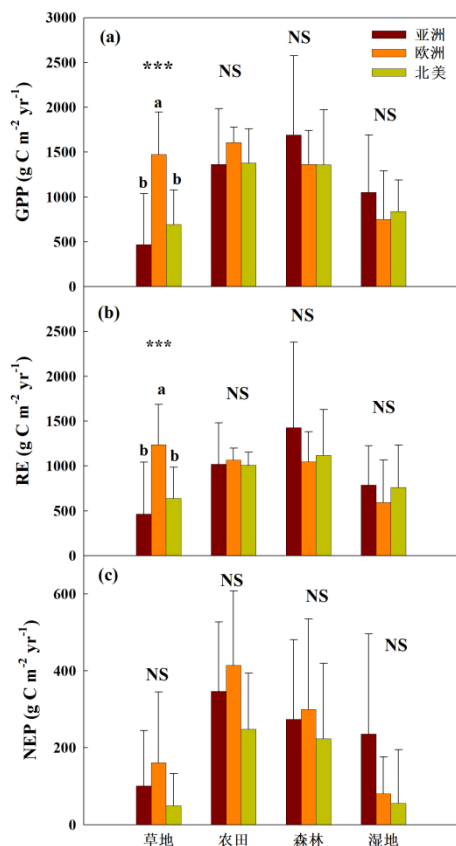
碳通量空间格局的影响因子及调控机制



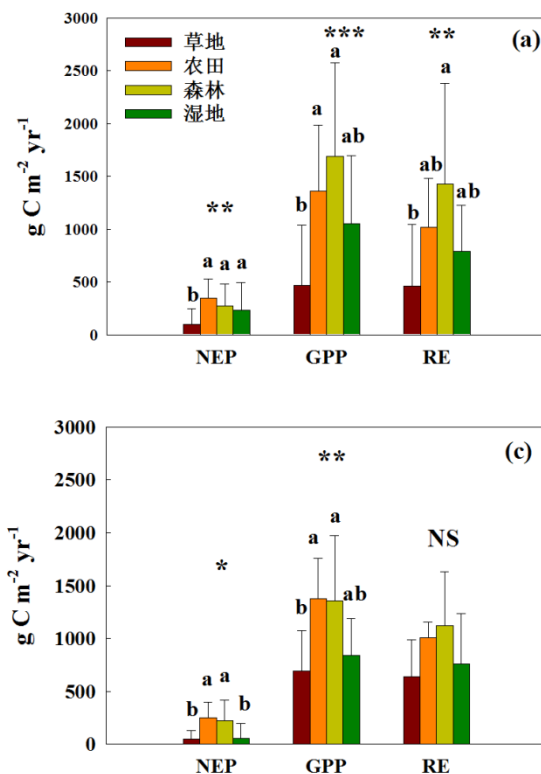


(1) 碳通量的区域统计特征

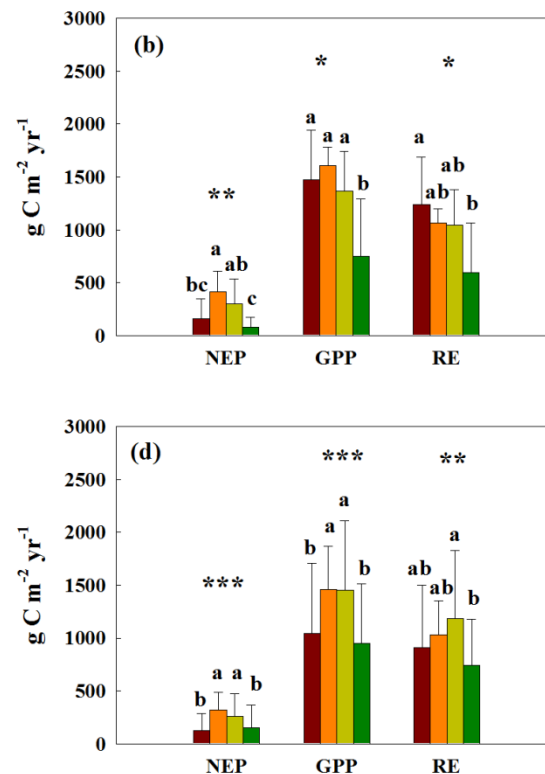
- 碳通量在三个洲际之间不存在显著的区域差异。
- 农田、森林(GPP、RE、NEP) > 草地、湿地

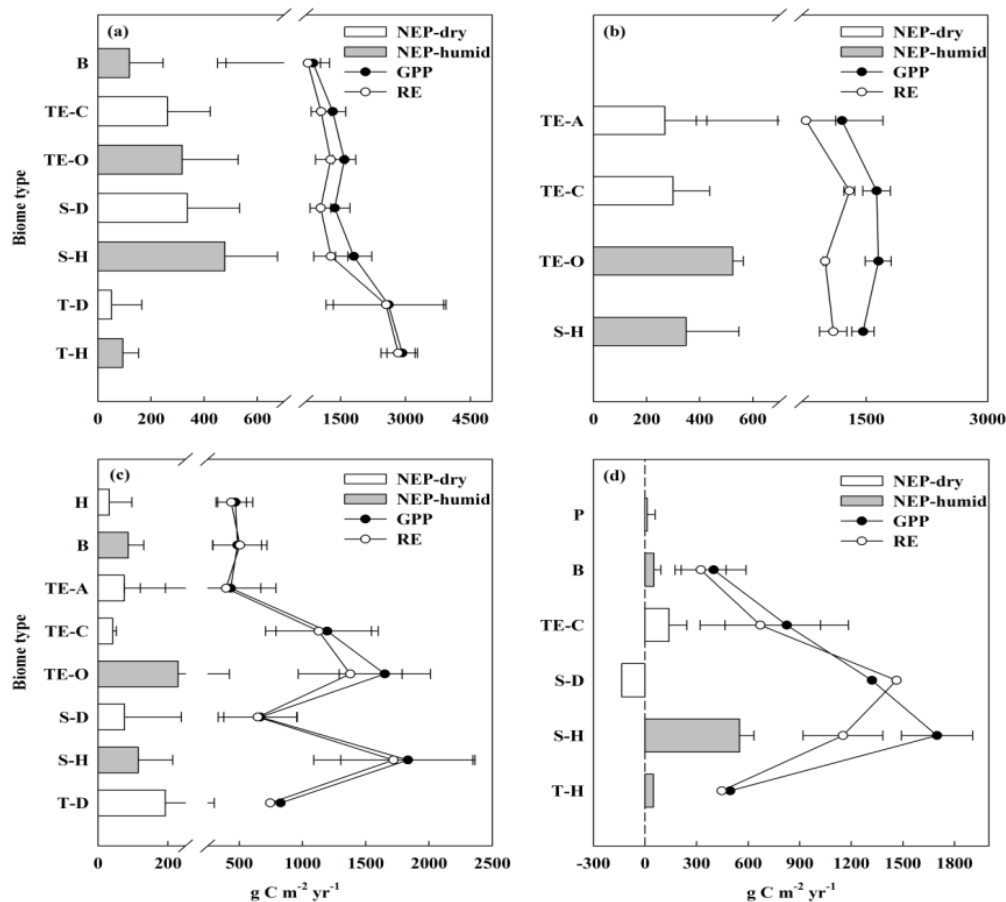


不同洲际间的碳通量特征



不同生态系统类型间的碳通量特征





不同气候区的碳通量特征

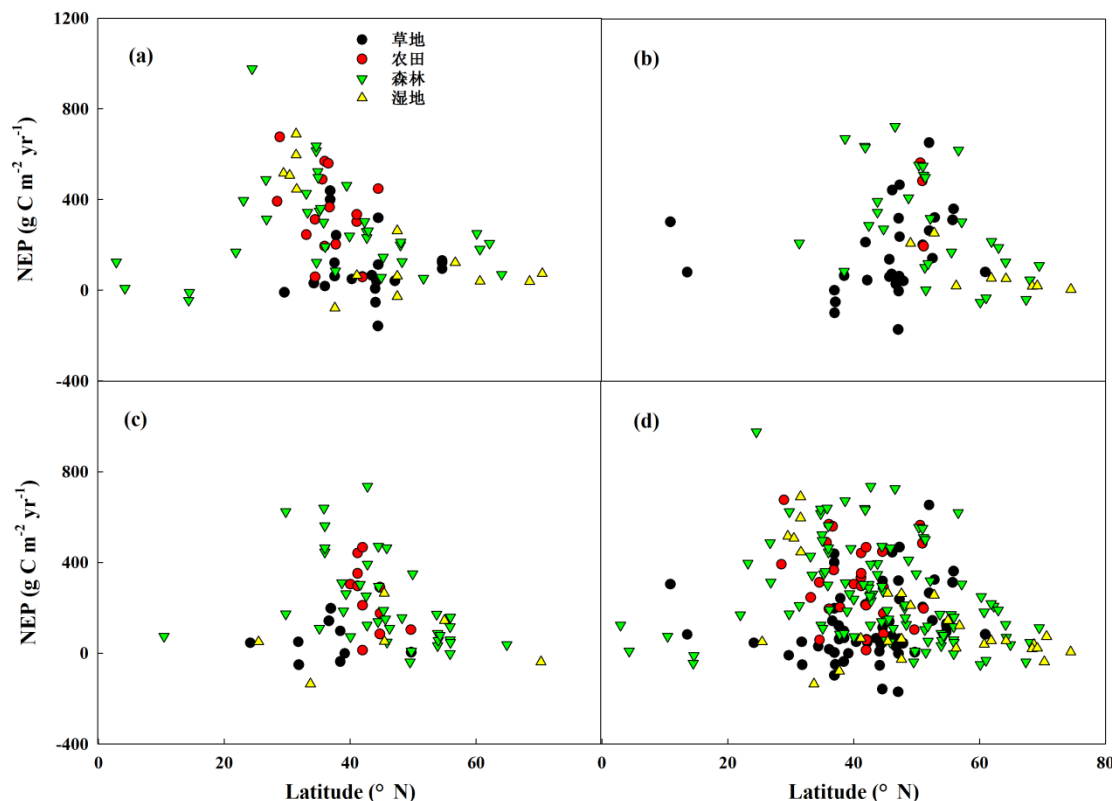
- 不同气候区的生态系统碳通量存在显著差异。
- GPP、RE和NEP呈现出从暖带向寒带逐渐降低的趋势。
- 受到气候区内的水分状况调节，在相同的热带、亚热带和温带区域，相对湿润的气候区具有更高的NEP。

陈智等, 2014, 第四纪研究





(2) 碳通量空间变异规律



■ 生态系统碳通量 (GPP、RE和NEP)在大尺度空间格局上存在着空间变异规律。

■ 总生产力GPP和呼吸RE随着纬度升高而降低。

■ 净生产力NEP则在中纬度的生态系统较高。

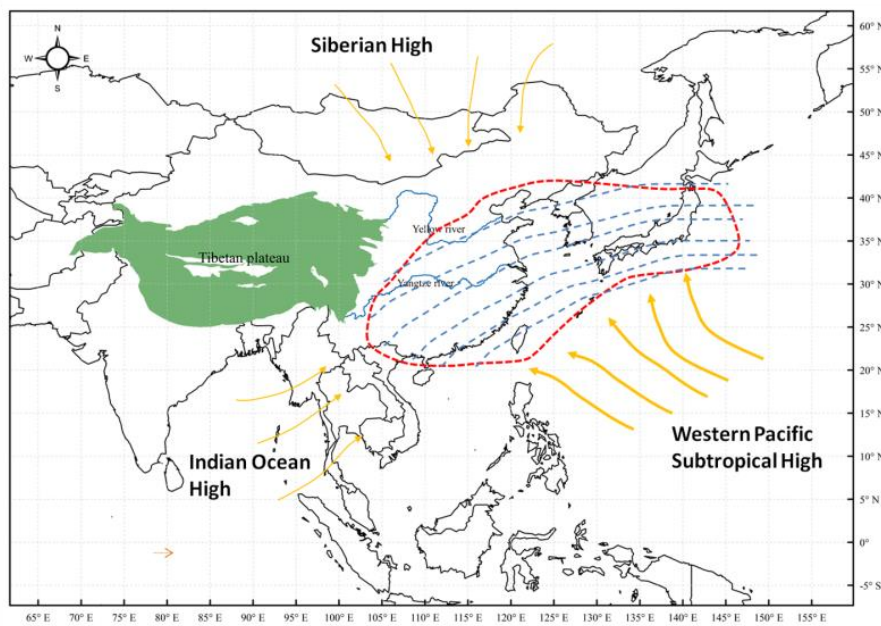
碳通量 (GPP、RE、NEP) 的空间分布格局



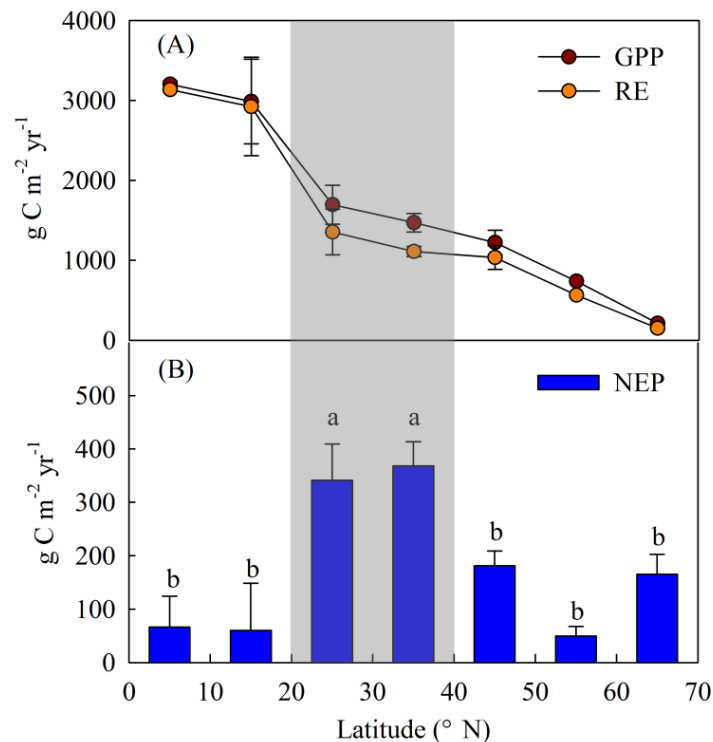


东亚季风区森林高碳汇功能区

- 发现**东亚季风区亚热带森林**是个被长期忽视的高碳吸收功能区
- 东亚季风区森林碳吸收强度平均约为 **$362 \pm 39 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$**

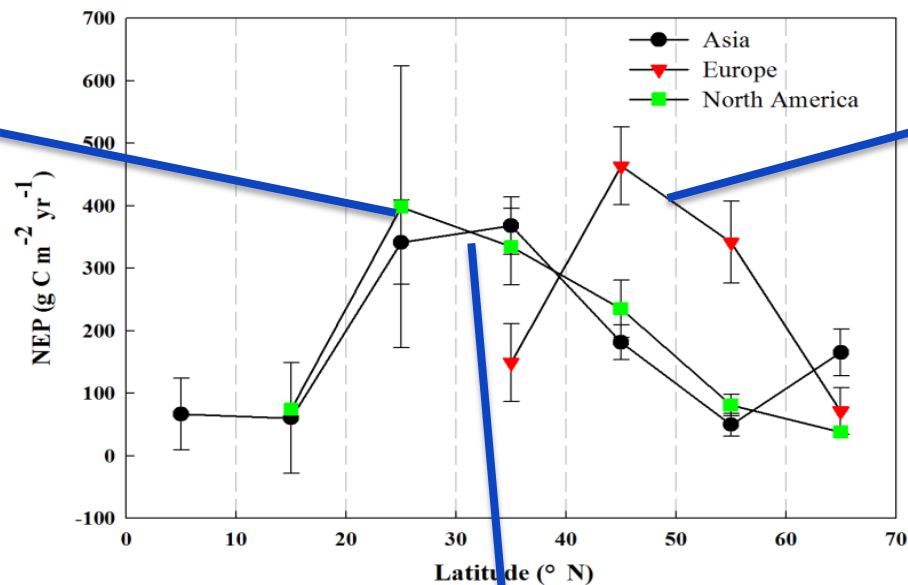


东亚季风区地理位置
($20-40^{\circ} \text{ N}$, $100-145^{\circ} \text{ E}$)

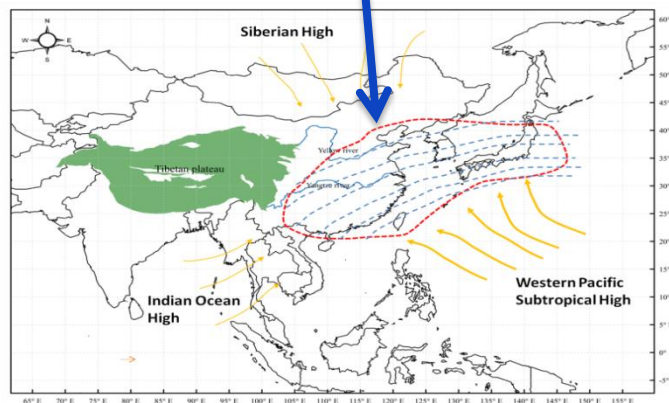


亚洲森林NEP的 10° 纬度分布特征



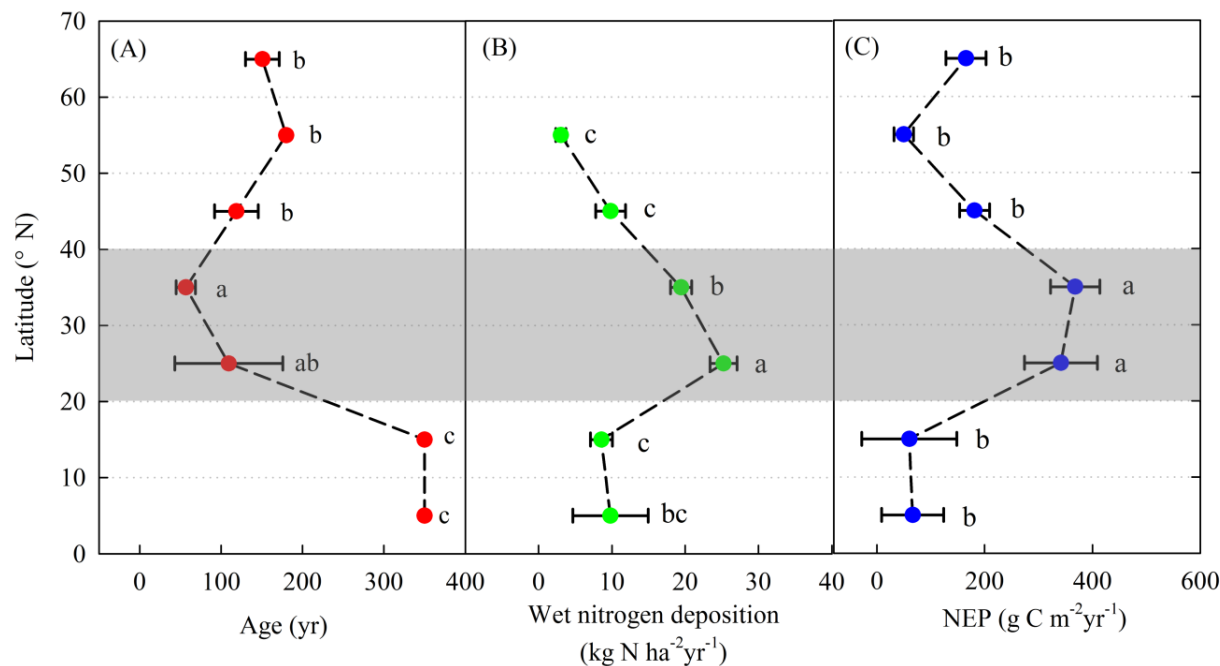


东亚季风区森林的碳吸收强度与被国际学术界广泛公认的两大碳汇区“北美和欧洲温带森林”的碳吸收强度相当。



挑战了过去仅认为欧美温带森林是主要碳汇功能区的传统观点

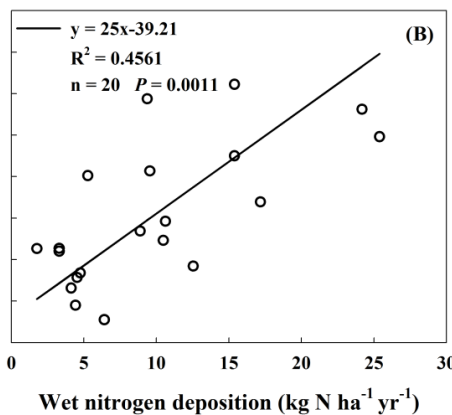
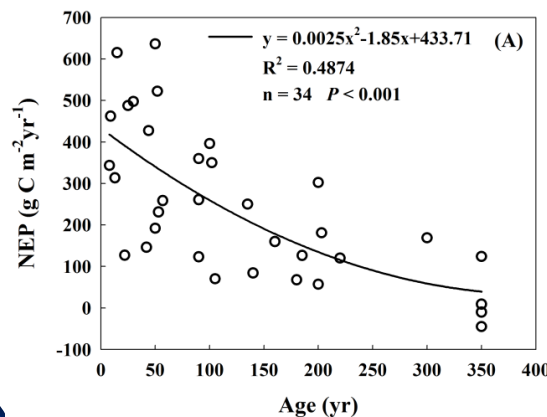




形成机理分析:
东亚季风区森林高
碳吸收强度是

- 区域高氮沉降量
- 年幼的林龄结构
- 适宜的气候特征

叠加作用的结果



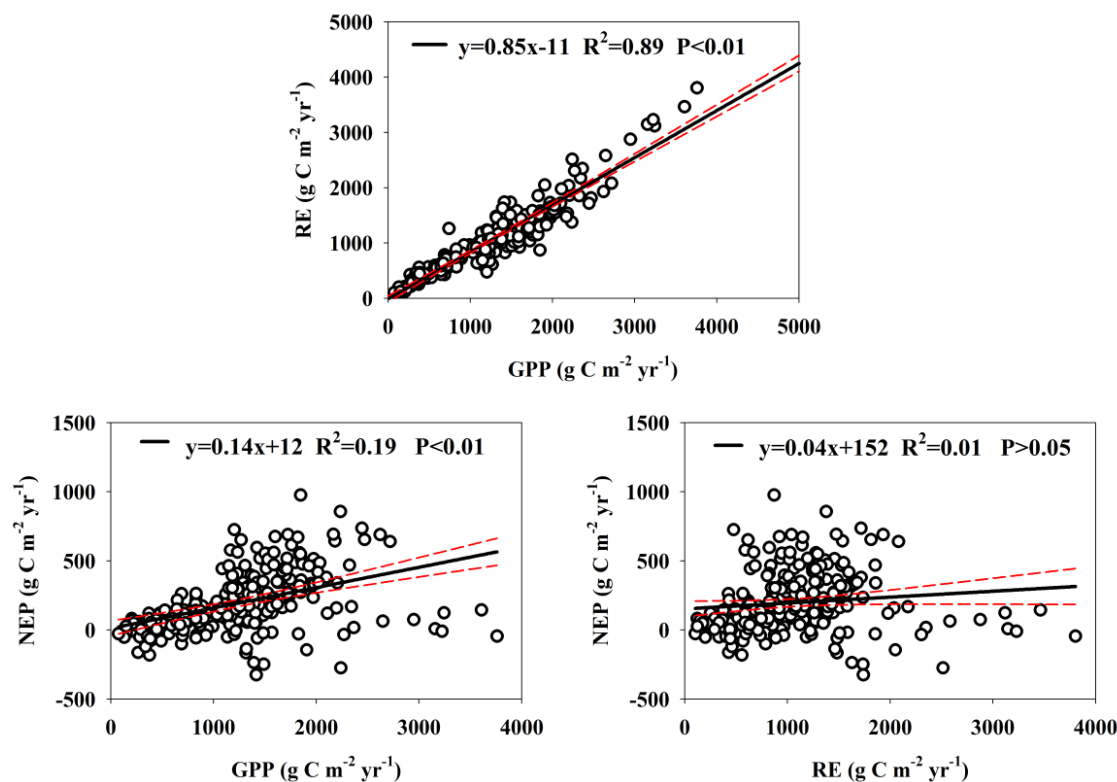
Yu and Chen et al., 2014, PNAS



(3) 碳通量间的偶联关系及其成因

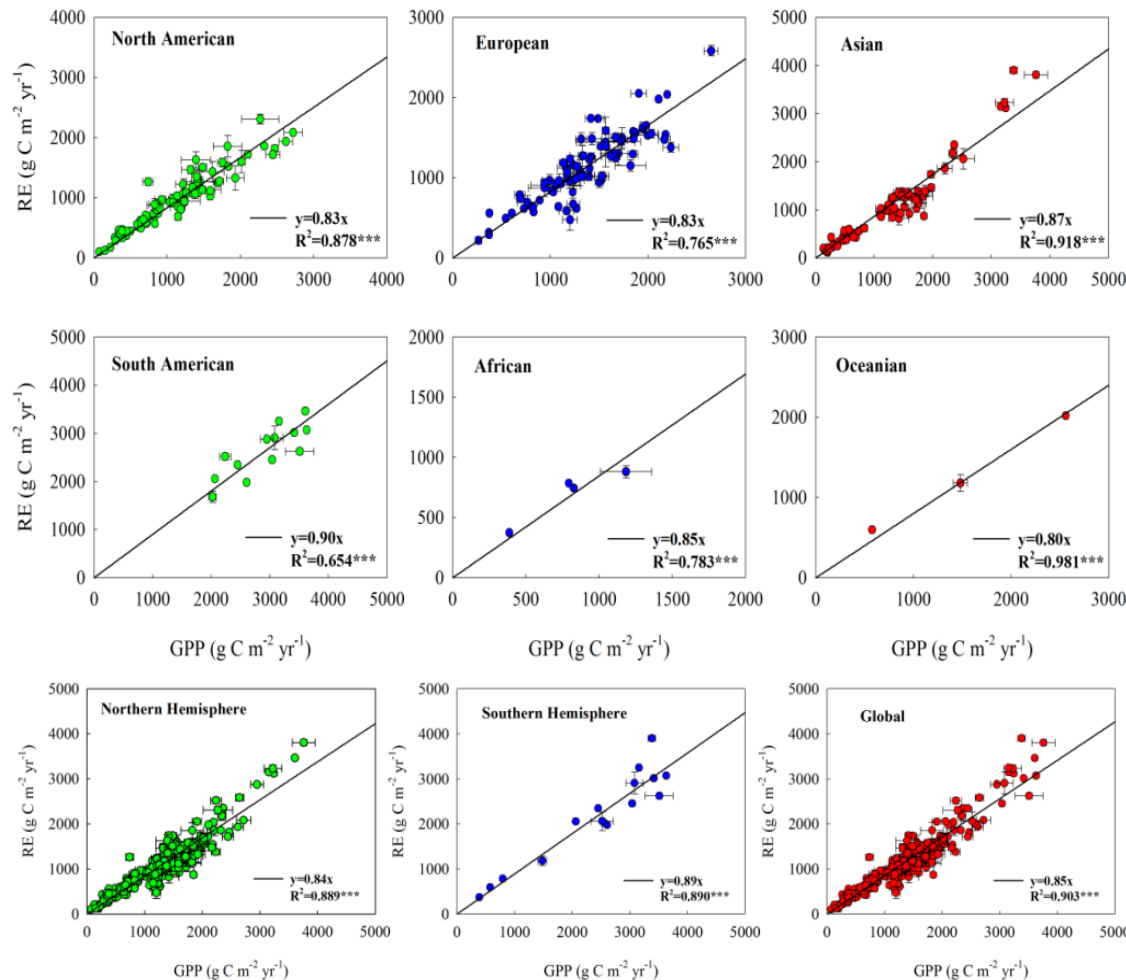


- GPP和RE在空间变异格局上同向偶联共变。
- NEP与GPP、RE在空间变异格局上无显著的偶联关系。



北半球GPP、RE、NEP空间变异的关联性





■ 从区域-半球-全球尺度，生产力GPP与呼吸RE的空间变异格局呈现出一致的“同向偶联共变规律”。

■ 回归斜率RE/GPP在六个区域之间以及南北半球之间均无显著差异。

北美洲、欧洲、亚洲、南美洲、非洲、大洋洲、北半球、南半球和全球范围GPP与RE空间格局的偶联共变性

Chen et al., 2015, Agricultural and Forest Meteorology





碳通量(GPP, RE)与气候因子(MAT, MAP, MAR)和植被因子(EVI)的相关系数矩阵

	MAT	MAP	MAR	EVI	GPP	RE
MAT	1	0.620***	0.540***	0.513***	0.643***	0.627***
MAP		1	0.056	0.637***	0.700***	0.702***
MAR			1	-0.08	0.049	0.055
EVI				1	0.723***	0.717***
GPP					1	0.951***
RE						1

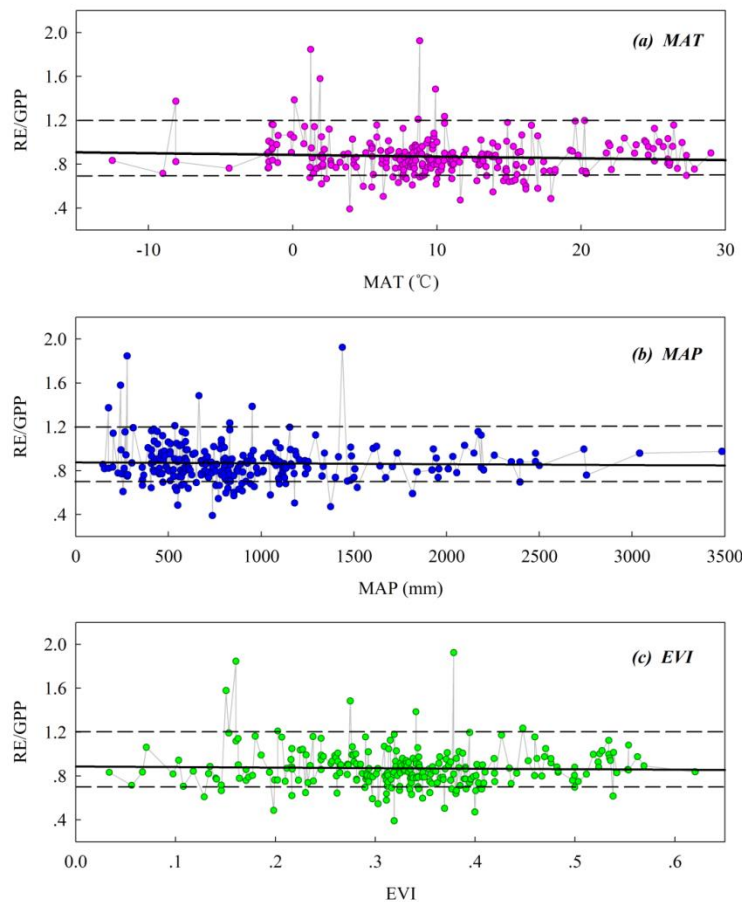
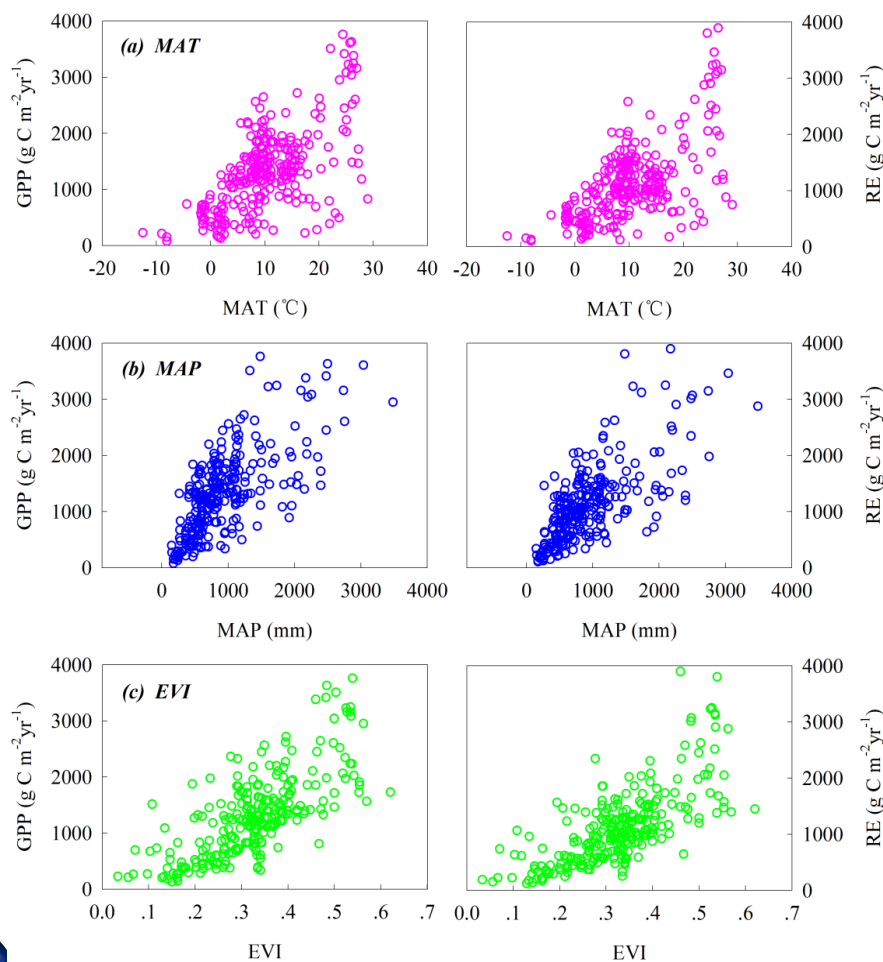
GPP和RE均与MAT、MAP和EVI存在显著的相关关系($P < 0.001$), 而与MAR无显著相关性($P > 0.05$)。





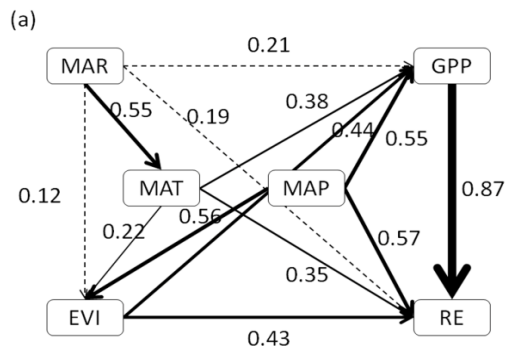
GPP和RE对MAT、MAP、EVI的空间变异具有一致的响应趋势

RE/GPP的比值不再随MAT, MAP和EVI空间梯度上的改变而改变, 稳定在0.7~1.2的范围内波动

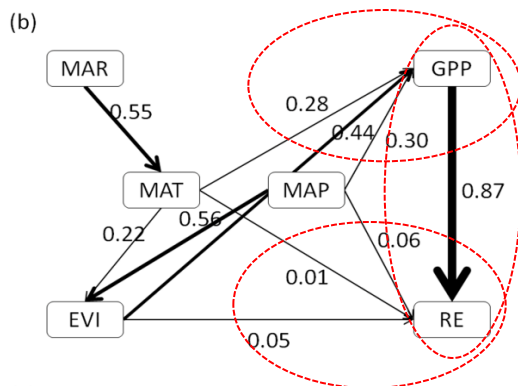




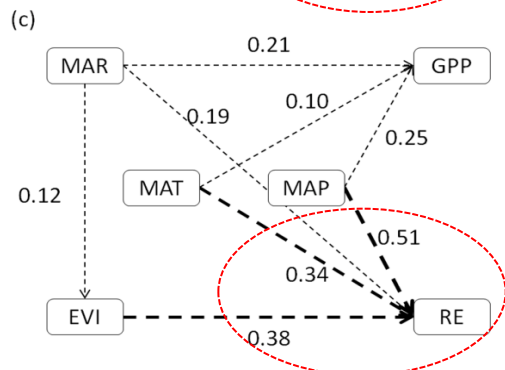
总作用



直接作用



间接作用



■ GPP与RE的空间格局均受MAT、MAP和EVI空间变异所调控，但是MAT、MAP和EVI对GPP和RE的作用途径却有所不同。

■ MAT、MAP和EVI的空间格局是GPP空间格局的直接决定因子。

■ MAT、MAP和EVI对RE的影响表现出更高的间接作用，RE的最大的直接作用来自于GPP。

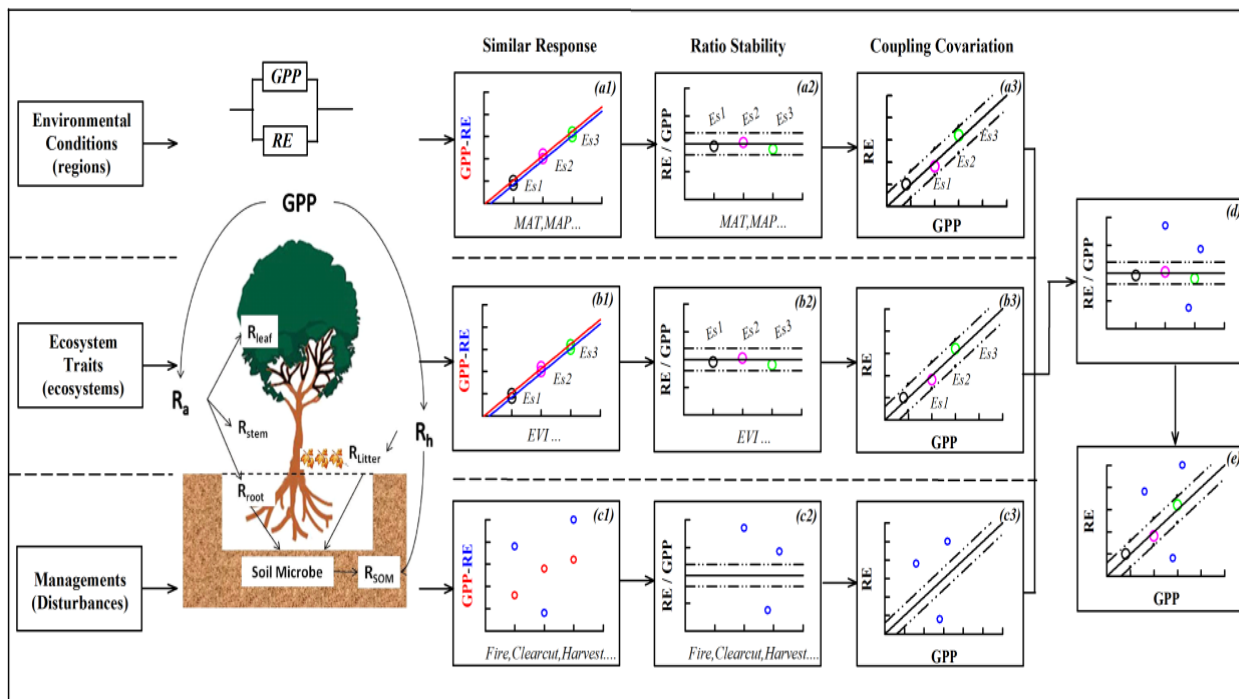
Chen et al., 2015, Agricultural and Forest Meteorology





形成机理分析:

- 共同的调控因子与相似的响应函数
- 生理学原因: 生产力GPP是RE呼吸底物的直接供给者



在空间变异格局上，**生产力水平的差异是呼吸差异的核心调控因素**，气候格局通过调控生产力格局来间接调控呼吸格局





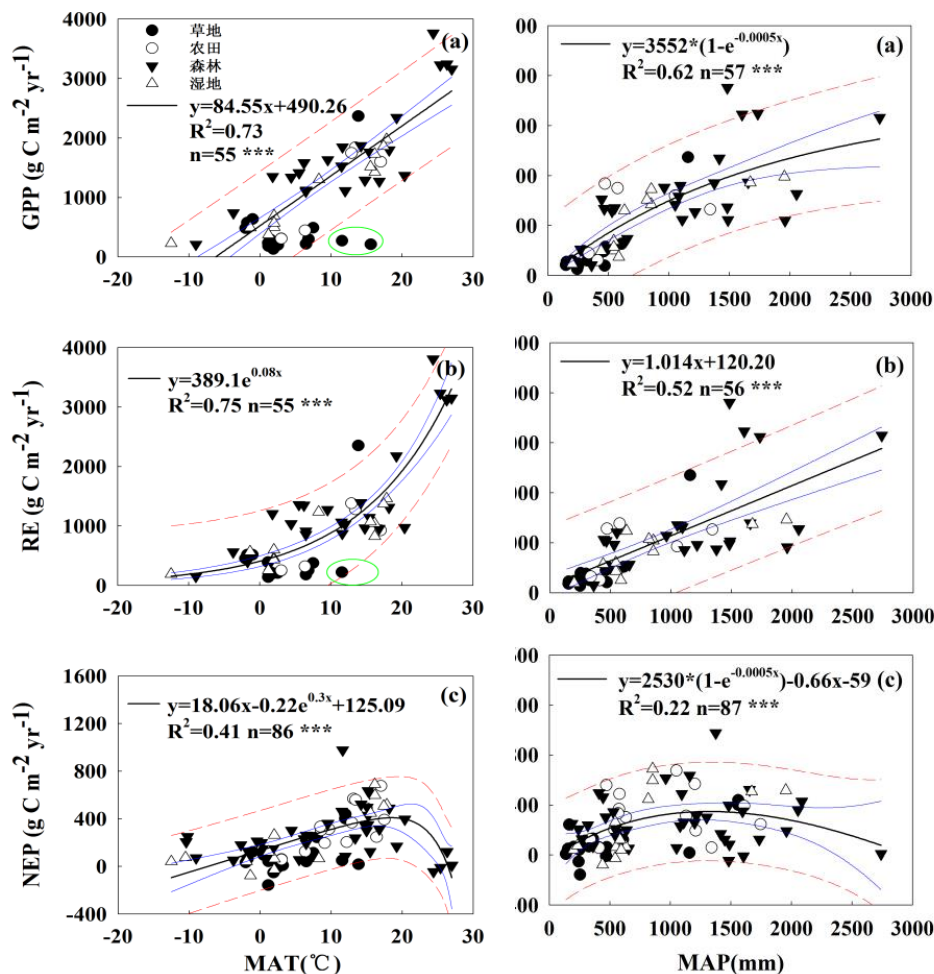
GPP和RE间观测的相关性(R^2_{obs})、自相关性(R^2_{sc})和差值(R^2)

Regions	CV_{NEE}	CV_{RE}	R^2_{obs}	R^2_{sc}	R^2
Asian	1.17	0.82	0.92	0.32	0.60
European	0.98	0.37	0.77	0.12	0.65
North American	1.39	0.50	0.88	0.12	0.76
South American	1.21	0.20	0.65	0.03	0.62
Oceanian	1.03	0.57	0.98	0.23	0.75
African	1.37	0.32	0.78	0.05	0.73
N.H.	1.41	0.47	0.89	0.10	0.79
S.H.	1.13	0.57	0.89	0.20	0.69
Global	1.16	0.61	0.90	0.21	0.69

目前的拆分过程对GPP和RE相关性分析的影响大约为20-30 %



(4) 碳通量空间格局的影响因子及调控机制



亚洲区域碳通量随年均温和年总降水量
空间变化的变异规律

■ 年均温和年总降水量是亚洲区域GPP、RE和NEP空间格局的主要调控因子。两者决定了亚洲GPP、RE和NEP的62-73%，52-75 %和22-41 %的空间变异性。

■ GPP和RE在空间格局上与MAT分别呈显著的线性和指数函数关系，与MAP呈显著的S型指数和线性函数关系。

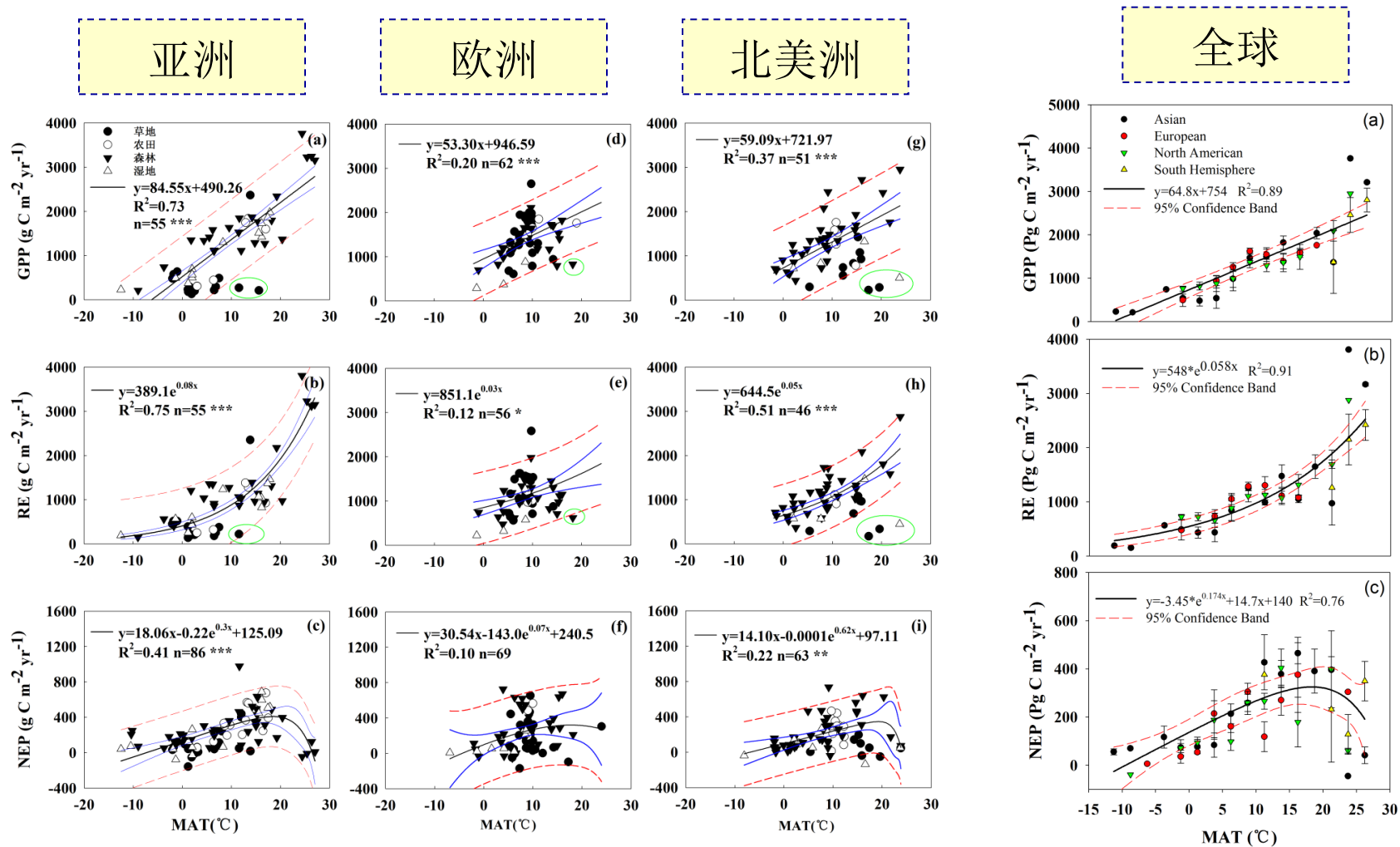
■ NEP空间变异受到GPP与RE对MAT和MAP响应方式的协同调控，由两者的响应差值函数决定。

Chen et al., 2013, Agricultural and Forest Meteorology





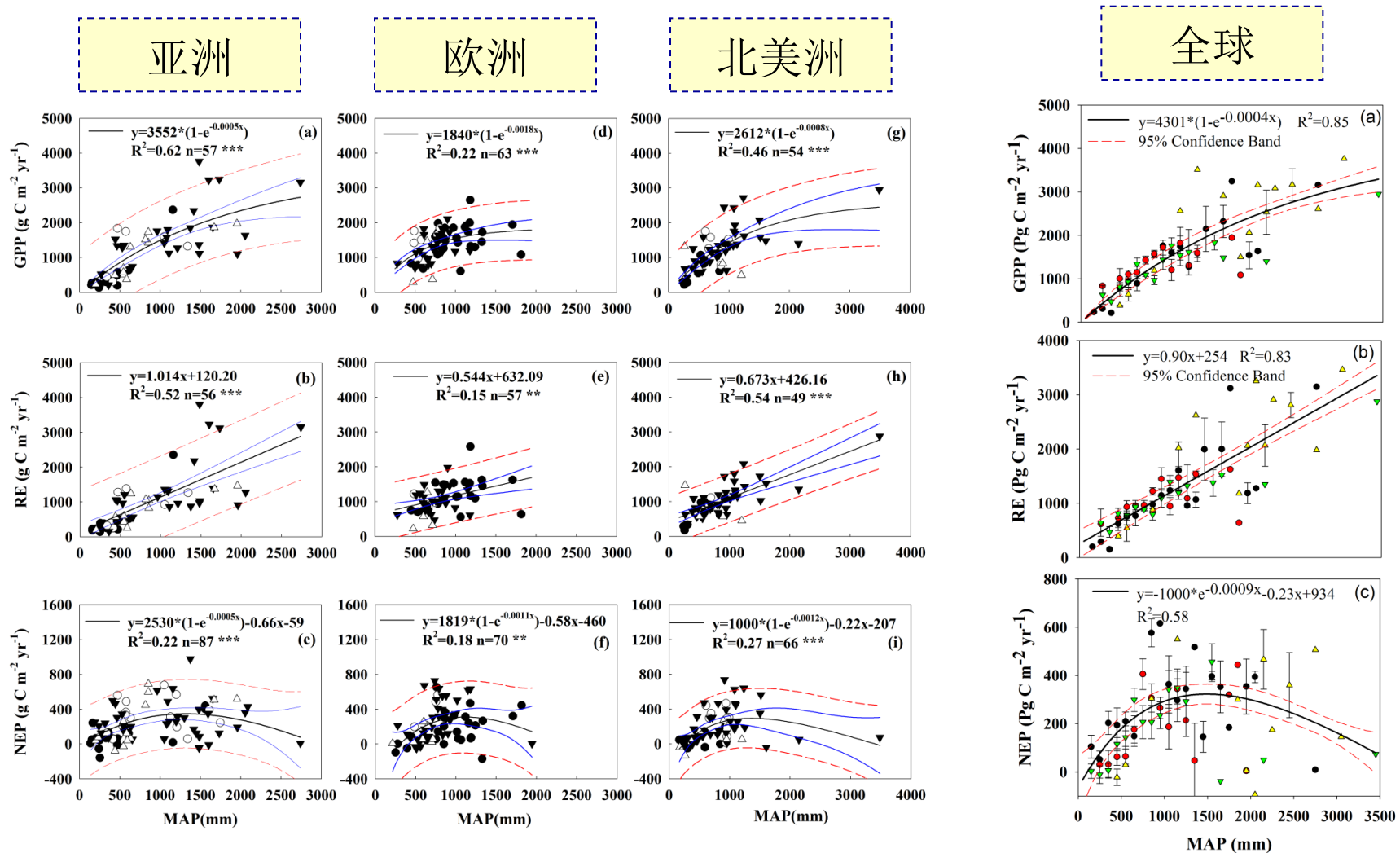
年均温格局对碳通量空间格局的调控作用



气候格局对碳通量空间变异的调控作用在亚洲、欧洲、北美洲以及全球尺度一致存在



年总降水量格局对碳通量空间格局的调控作用

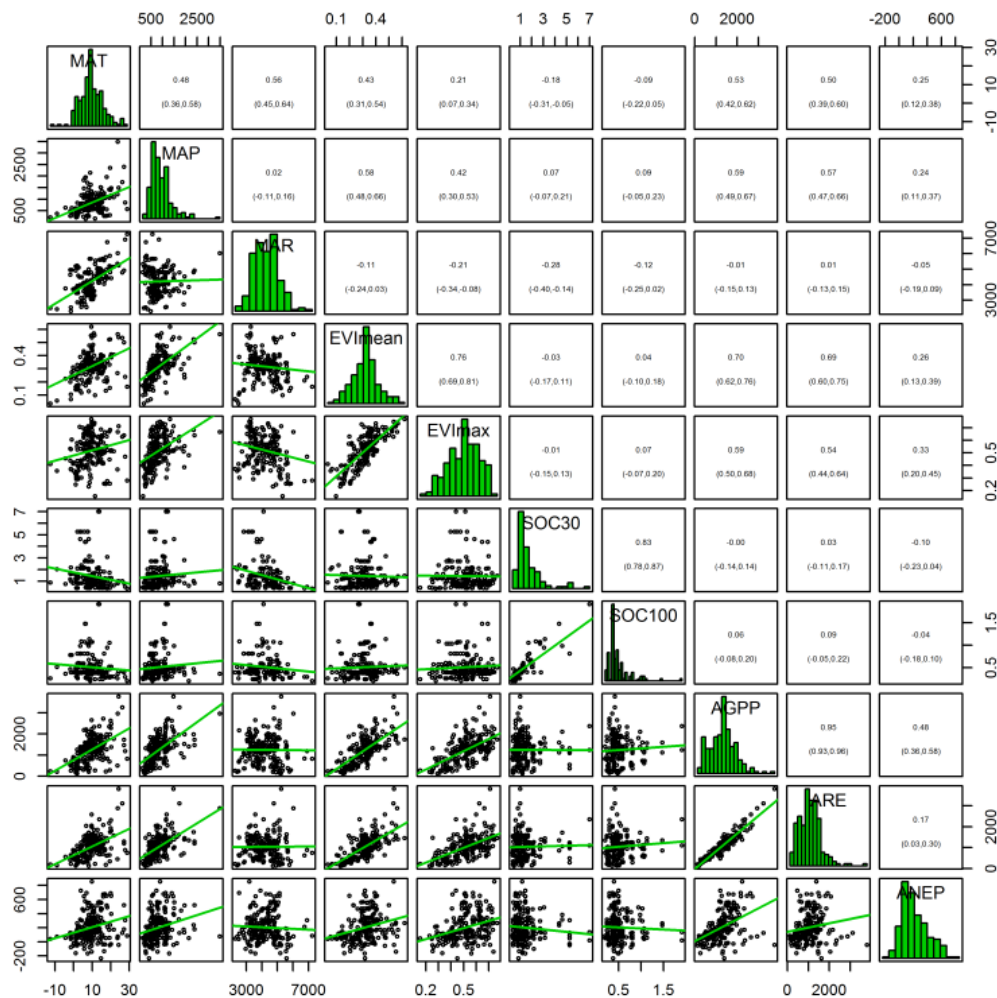


Chen et al., 2013, Agricultural and Forest Meteorology; Yu et al., 2013, Global Change Biology

Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling



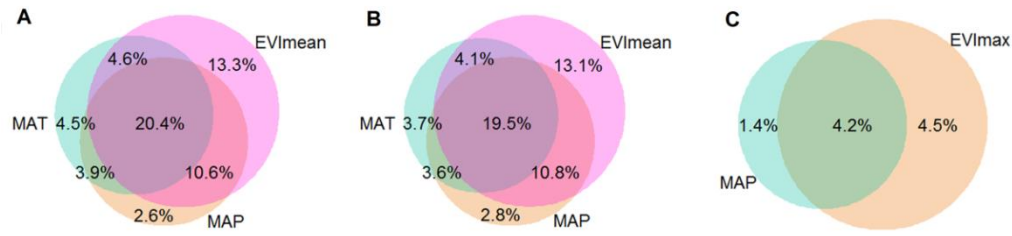
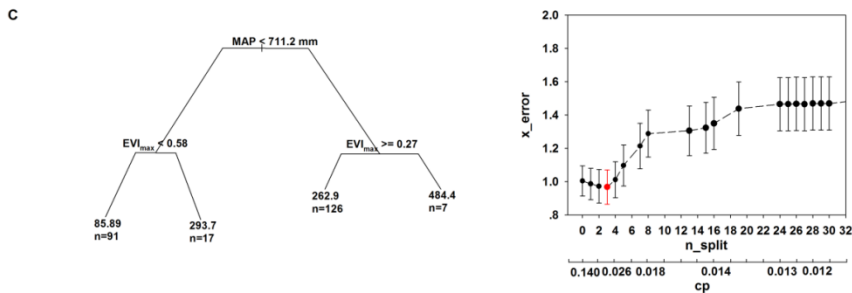
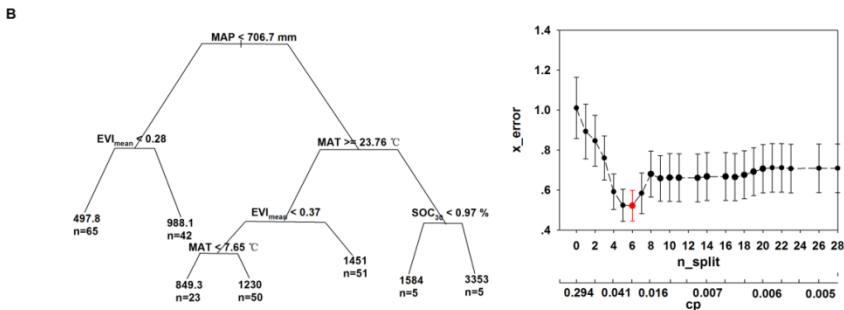
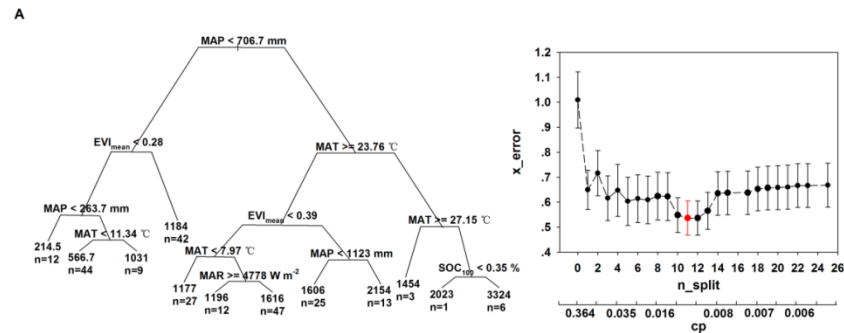
植被、土壤格局对碳通量空间格局的调控作用



■ GPP、RE 和 NEP 分别与 MAT、MAP、 EVI_{mean} 和 EVI_{max} 显著正相关 ($P < 0.01$)，而与 MAR、 SOC_{30} 和 SOC_{100} 无显著相关性 ($P > 0.05$)。

碳通量与各个影响因子的相关性

Chen et al., 2015, PLoS ONE



气候和植被因子对GPP、RE、NEP的调控作用大小

■ MAT和MAP是GPP和RE空间格局的主要调控因子。两者通过调控EVI的空间变异决定了北半球60 % 的GPP空间变异和58 %的RE空间变异。

■ 土壤有机碳含量对GPP和RE空间格局的调控作用较小。

■ 气候和植被格局对NEP空间变异的调控作用低于GPP和RE。

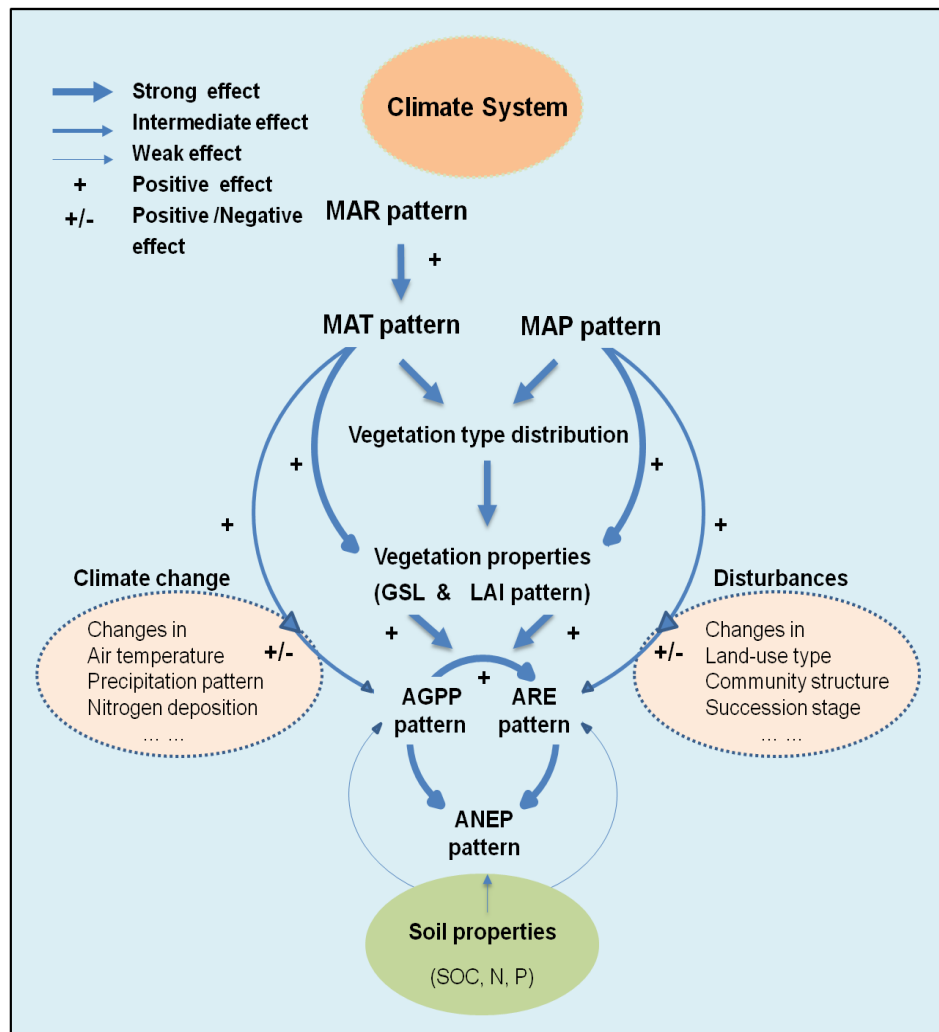
GPP、RE、NEP的分层回归树

Chen et al., 2015, PLoS ONE

Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling



碳通量空间格局的生物地理生态学调控机制



调控机理解析:

- 辐射+温度+降水→植被类型的地理分布
- 植被类型→植被生理生态学特征(叶面积大小LAI+生长季长度GSL)→GPP
- $GPP \rightarrow RE$
- 土壤有机碳 | 影响较小
- $NEP \leftarrow GPP - RE + \Delta$
(Δ : 氮沉降、干扰...)

生态系统碳通量空间格局的生物地理生态学调控机制

Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling

Chen et al., 2015, PLoS ONE;
Yu et al., 2015, Global Ecology and
Biogeography (in revision)



参考文献



1. Yu Guirui, **Chen Zhi**, Piao Shilong et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
2. **Chen Zhi**, Yu Guirui, Ge Jianping et al. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182-183: 266-276.
3. **Chen Zhi**, Yu Guirui, Zhu Xianjin et al. Covariation between gross primary production and ecosystem respiration across space and the underlying mechanisms: a global synthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 180-190.
4. **Chen Zhi**, Yu Guirui, Ge Jianping et al. Roles of climate, vegetation and soil in regulating the spatial variability in ecosystem carbon dioxide fluxes in the Northern Hemisphere. *PLoS ONE*, 2015, 10(4): doi: 10.1371/journal.pone.0125265.
5. Yu Guirui, Zhu Xianjin, Fu Yuling et al. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 2013, 19: 798-810.
6. 陈智, 于贵瑞, 朱先进, 等. 北半球陆地生态系统碳交换通量的空间格局及其区域特征. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 710-722.





衷心感谢中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)和全球碳通量观测网络的每一位碳通量观测者的辛勤付出和为本博士学位论文提供的宝贵数据。

谢谢！

请各位老师和同学批评指正！

